



TESIS (TM 142501)

**STUDI NUMERIK TENTANG PENGENDALIAN SEPARASI ALIRAN DI  
DALAM *CONICAL DIFFUSER* MENGGUNAKAN *CIRCULAR RING  
VORTEX GENERATOR***

CHAIRUNNISA

NRP. 2113 202 012

Pembimbing:

Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, Ph.D

NIP. 196412281990031002

**PROGRAM MAGISTER**

**BIDANG KEAHLIAN REKAYASA KONVERSI ENERGI**

**JURUSAN TEKNIK MESIN**

**FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI**

**INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**

**SURABAYA**

**2015**



THESIS (TM 142501)

*NUMERICAL STUDY SEPARATION FLOW CONTROL IN CONICAL  
DIFFUSER USING A CIRCULAR RING VORTEX GENERATOR*

CHAIRUNNISA

NRP. 2113 202 012

Supervisor:

Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, Ph.D

NIP. 196412281990031002

MASTER PROGRAM

ENERGY CONVERSION ENGINEERING

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT

FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2015



Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (M.T.)  
di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:  
Chairunnisa  
Nrp. 2113 202 012

Tanggal Ujian : 23 Juni 2015  
Periode Wisuda : September 2015

Disetujui oleh :

1. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D.  
NIP. 196412281990031002

(Pembimbing I)

2. Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.  
NIP. 197104051997021001

(Penguji)

3. Dr. Ir. Heru Mirmanto, MT.  
NIP. 196202161995121001

(Penguji)

4. Dedy Zulhidayat Noor, ST., MT., Ph.D.  
NIP. 197512062005011002

(Penguji)

Direktur Program Pascasarjana,

Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.  
NIP. 19640405 19900210 01



## ***Numerical Study Flow Separation Control in Conical Diffuser Using a Circular Ring Vortex Generator***

**Student Name** : Chairunnisa  
**NRP** : 2113202012  
**Departement** : Postgraduate Mechanical Engineering FTI-ITS  
**Supervisor** : Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D.

### ***Abstract***

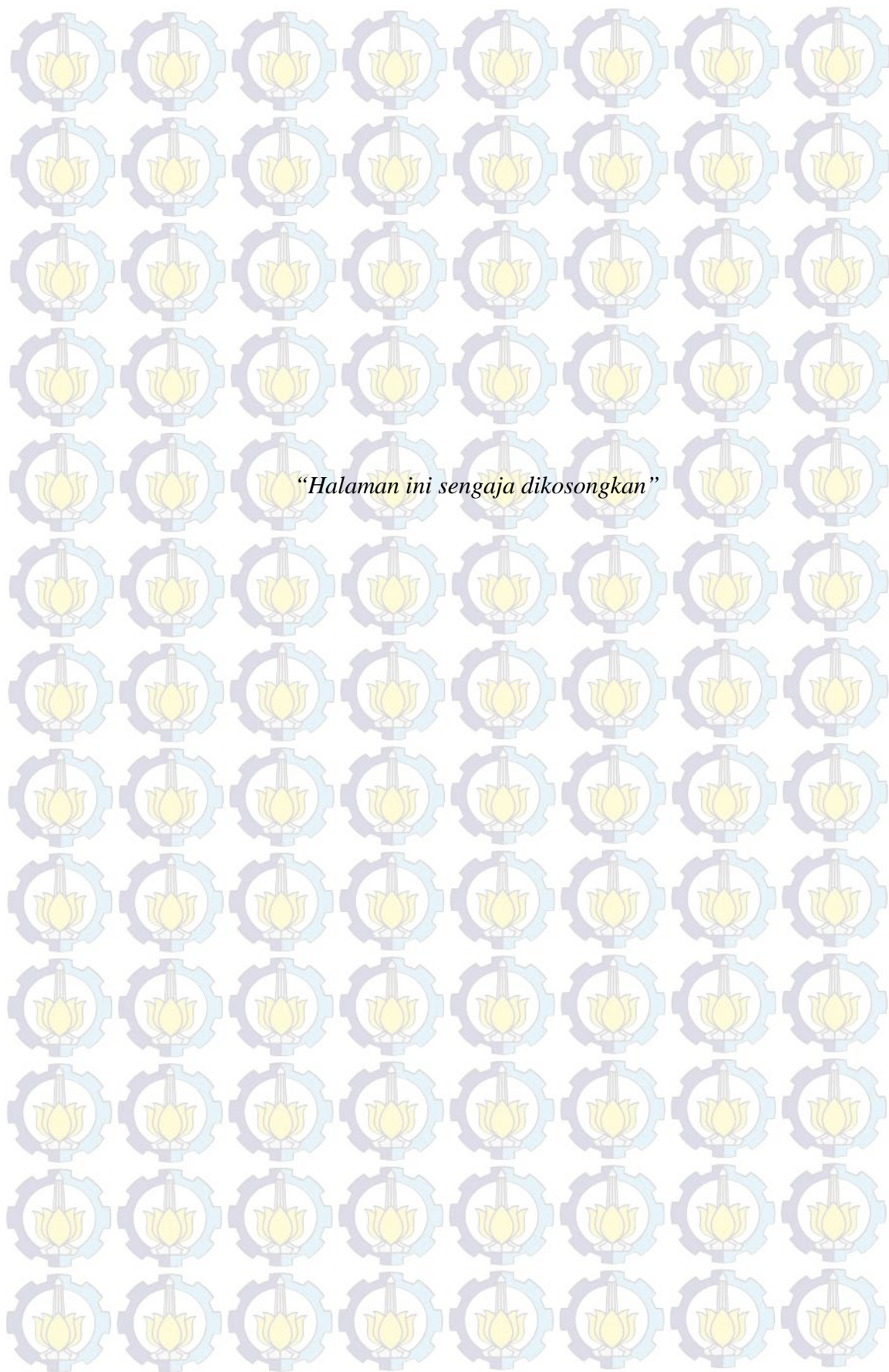
*Diffuser is a tool used to convert kinetic energy into pressure energy. Diffuser is a closed channel which cross-sectional area enlarges along the flow. Diffuser is used in industrial field such as heat recovery steam generator (HRSG). The main parameter of diffuser performance is pressure recovery coefficient (Cpr), where the performance of diffuser is considered good if it has a high value Cpr. Cpr with low value is caused by flow separation. Flow separation is caused by large adverse pressure gradient (APG) and excessive friction effect. One of the efforts in controlling the separation is modification of diffuser with addition of vortex generator. Vortex generator contributes to improve flow turbulence to be able against APG and friction effect. Therefore, a research on diffuser modification is needed to determine the changes in the value of Cpr.*

*This study is performed numerically using CFD software. Geometry model used in this research is 3D conical diffuser that has constant divergence angle ( $2\theta$ ) =  $30^\circ$  with variations of area ratio (AR) 2, 6, and 8. Upstream channel length ( $L_1$ ) = 200 mm, diffuser length (N) = 31, 108, and 137 mm, and downstream channel length ( $L_2$ ) = 452.8, 784 and 905.6 mm. The profile vortex generator is a circular ring mounted at a distance  $x/N$  of 0.1 from the diffuser inlet which the flow is assumed to be steady. In this study, the variation of Reynolds number ( $Re_{DI}$ ) =  $1.89 \times 10^4$  and  $4.50 \times 10^4$  based on the diameter of the diffuser inlet and the flow velocity at the diffuser inlet. The standard k- $\epsilon$  model and the second order discretization type is used in this study.*

*The results of the study indicate that the addition of vortex generators at AR = 2 for  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$  does not cause flow separation. On the other hand, the model of conical diffuser with the others configuration indicate a delay separation for all variations of the AR and  $Re_{DI}$ . The delayed separation makes the performances of diffuser increases. It is followed by an increase in Cpr and  $Cp_{max}$  values. At  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$  and  $4.50 \times 10^4$ , the value of Cpr decrease 26.3% and 7.8% for AR = 2, but Cpr value increase 6.04% and 16.5% for AR = 6, and AR = 8 Cpr value increase 13.5% and 21.4% based on baseline model. Total pressure loss coefficient ( $\zeta$ ) increases as AR increases. Instead  $\zeta$  value decreases after adding the vortex generator in the diffuser.*

***Keywords: conical diffuser, vortex generator, pressure recovery coefficient, total pressure loss coefficient ( $\zeta$ ), flow separation.***







## KATA PENGANTAR

Syukur Alhamdulillah Penulis panjatkan kehadiran Allah SWT, karena atas limpahan rahmat, petunjuk, hidayah, rizki dan ijin-Nya penyusunan tugas akhir ini dapat terselesaikan tanpa adanya halangan yang cukup berarti. Dalam penyusunan tugas akhir ini tidak dapat dipungkiri ada begitu banyak dukungan dan bantuan yang di berikan berbagai pihak baik secara moril maupun material. Pada kesempatan ini Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu penyelesaian tugas akhir ini, antara lain :

1. Bapak Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., PhD selaku dosen pembimbing tesis yang telah meluangkan waktu dan tenaga di tengah kesibukan, serta memberikan motivasi dalam mengerjakan tesis ini dan ilmu yang tak ternilai harganya. Saya akan selalu berusaha menjadi yang terbaik.
2. Bapak Dr. Ir. Heru Mirmanto, MT, Bapak Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT., dan Bapak Dedy Zulhidayat, ST., MT., Ph.D selaku dosen penguji yang telah meluangkan waktu untuk menguji tesis ini. Terima kasih atas saran dan ilmu yang di berikan untuk kesempurnaan tesis saya ini.
3. Bapak Bambang Arip, ST., M.Eng., Ph.D sebagai dosen wali Penulis yang telah membantu penulis selama kuliah di Pascasarjana Teknik Mesin ITS serta atas segala motivasi, masukan, dan nasehat yang selalu di berikan selama ini. Terima kasih banyak Bapak untuk semuanya.
4. DIKTI sebagai pihak pemberi dana beasiswa *Fresh Graduate* yang telah mendanai selama penulis menempuh jenjang pendidikan strata 2.
5. Mamaku Fitmahartini, untuk segala doa, kasih sayang yang akan selalu ada, nasehat yang tidak ternilai harganya, motivasi-motivasi yang selalu hadir di tengah kehampaan dan keresahan hati. Ayah Syamsuir, walaupun jauh terimakasih atas kasih sayang, semangat dan doanya hingga penulis dapat menyandang gelar Magister.
6. Celo Mini, Da' Isyaf, Da' Daus, terima kasih atas bantuannya selama saya kuliah di Surabaya dan motivasi serta inspirasi yang diberikan. Maaf kalau menjadi adik yang merepotkan.



7. Adekku Wiwit, terimakasih buat motivasinya untuk segera menyanggah gelar Magister. Semoga tahun 2017 Wiwit sudah bisa menyanggah gelar Magister. Kita sukses buat Mama bangga. Alhamdulillah ^o^
8. Segenap saudaraku AREK M52, dari poros 2009, kini dan seterusnya semoga silaturahmi ini tetap terjaga.
9. Esthi, Atik, dan Dio yang selalu menemani dalam segala langkah pengerjaan tesis. Terimakasih atas *sharing* ilmunya.
10. Warga Lab Perpindahan Panas dan Mass, Azwar, Wildan, Tomi, Nazila, dan adik-adik M54 lainnya terimakasih telah membantu kelancaran dalam pembuatan tesis ini dan memberikan warna yang indah semasa perkuliahan.
11. Warga Lab Mekflu, Aulia, Khanafi, Rizka, dan lain-lain. Terimakasih atas *sharing* ilmunya. Ilmu yang kalian berikan sangat berharga.
12. Warga Lab Simulasi, Fitro, Mas Antok, Mas Wahyu, Mas Ruli, Mas Ihsan, terimakasih atas ilmu, saran, dan motivasi yang telah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan tesis ini.
13. Teman-teman seperjuangan di RKE'13, Mbak Intan, Novi, Indah, Mbak Dini, Mbak Eky, Pak Masykur, Mas Nanang, Mas Suli, Pak Arif, Mbak Wulan, dan lain-lain terima kasih untuk semua kenangan yang tak terlupakan.
14. Mas koko, yang selalu meluangkan waktu, selalu memberi nasehat, perhatian dan kasih sayang. Maaf mas selama ini Saya merepotkan. Terimakasih.
15. Sahabat Saya, Ratih Novie Arini dan Mbak funky, terimakasih atas motivasinya dalam menyelesaikan tesis ini.
16. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Mesin ITS.
17. Semua Pihak yang tidak dapat Penulis sebut satu persatu. Terima Kasih banyak untuk segala macam bantuannya.

Penulis menyadari bahwa Tesis ini masih terdapat kekurangan yang dapat digunakan sebagai pertimbangan untuk penelitian selanjutnya. Penulis

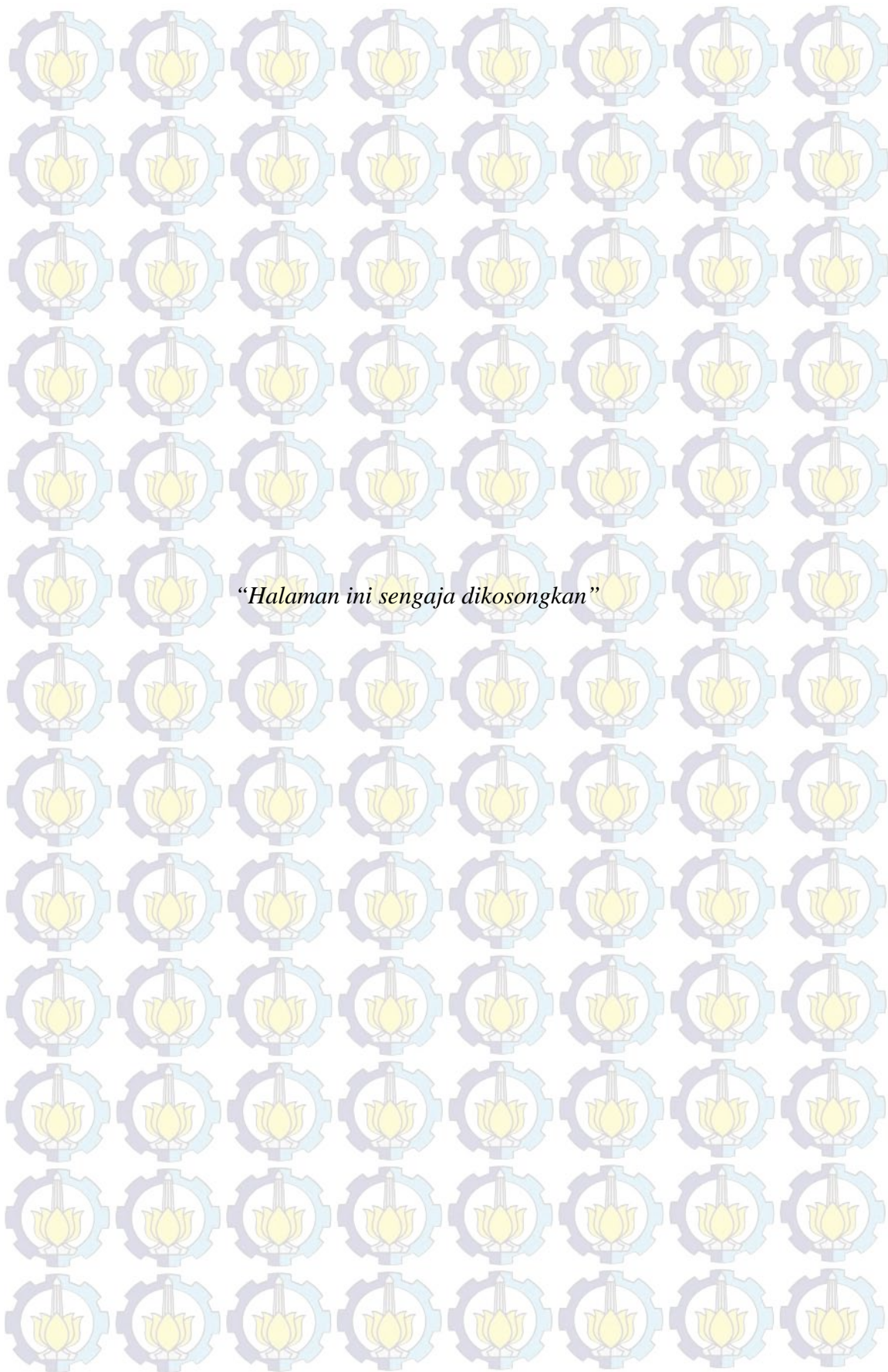


mengharapkan kritik dan saran untuk perbaikan di masa mendatang. Semoga  
Tesis ini bermanfaat bagi kita semua. Amien.

Surabaya, Juli 2015

Penulis







## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
ABSTRAK .....	vii
KATA PENGANTAR .....	x
DAFTAR ISI .....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR TABEL .....	xvii
DAFTAR SIMBOL .....	xix
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	3
1.3. Tujuan Penelitian .....	4
1.4. Batasan Masalah .....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	7
2.1. Konsep <i>Boundary Layer</i> .....	7
2.1.1. Pengaruh <i>pressure gradient</i> terhadap kondisi <i>boundary layer</i> .....	8
2.1.2. Karakteristik <i>Boundary Layer</i> .....	10
2.2. Geometri Diffuser .....	11
2.3. <i>Pressure coefficient</i> ( $C_p$ ) dan <i>Pressure recovery coefficient</i> ( $C_{pr}$ ) dan <i>Loss coefficient</i> ( $k$ ) .....	17
2.4. Analisa aliran di dalam <i>diffuser</i> .....	19
2.4.1. Pengaruh variasi sudut divergensi dalam <i>diverging conical duct</i> ..	19
2.4.2. Pengaruh <i>Reynolds number</i> terhadap performa <i>conical diffuser</i> ...	22
2.5. Pengendalian separasi aliran di dalam <i>conical diffuser</i> .....	23
2.5.1. Pengaruh pengendalian separasi aktif terhadap performa <i>conical diffuser</i> .....	23
2.5.2. Pengaruh pengendalian separasi pasif terhadap performa <i>conical diffuser</i> .....	25
2.5.3. Penelitian secara numerik <i>conical diffuser</i> dengan bentuk inlet <i>velocity profil uniform</i> dan <i>wake</i> .....	27
2.6. Fenomena aliran sekunder didalam <i>diffuser</i> .....	29
2.7. Karakteristik <i>pressure coefficient</i> ( $C_p$ ) dan <i>skin friction coefficient</i> ( $C_f$ ) didalam <i>diffuser</i> .....	31
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b> .....	35
3.1. Geometri <i>Diffuser</i> .....	35
3.2. Metode Numerik .....	37
3.2.1. Tahap <i>pre-processing</i> menggunakan software GAMBIT 2.4.6 .....	37
3.2.2. Tahap <i>post-processing</i> menggunakan software Fluent 6.3.26 .....	39
<b>BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN</b> .....	43
4.1. Profil Kecepatan .....	43
4.1.1. Distribusi Perubahan Kecepatan Maksimum .....	43
4.1.2. Distribusi Profil Kecepatan .....	47



4.1.3. Visualisasi Kecepatan Aliran .....	53
4.1.4. Visualisasi Aliran Sekunder Pada Bidang Melintang .....	60
4.2. Profil Intensitas Turbulensi .....	64
4.2.1. Distribusi Perubahan Intensitas Turbulensi .....	64
4.2.2. Distribusi Profil Intensitas Turbulensi .....	67
4.3. Distribusi <i>Pressure Coefficient</i> ( $C_p$ ) .....	72
4.4. <i>Total Pressure Loss Coefficient</i> ( $\zeta$ ) .....	83
4.5. <i>Loss Coefficient</i> ( $k$ ) .....	85
4.6. <i>Skin Friction Coefficient</i> ( $C_f$ ) .....	86
4.7. Diskusi .....	91
<b>BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>95</b>
6.1. Kesimpulan .....	95
6.2. Saran .....	96
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>99</b>



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	<i>Boundary layer</i> laminar dan turbulen sepanjang pelat datar .....	8
Gambar 2.2.	Perkembangan <i>boundary layer</i> akibat pengaruh <i>pressure gradient</i> .....	9
Gambar 2.3.	Definisi ketebalan <i>boundary layer</i> , <i>displacement thickness</i> dan <i>momentum thickness</i> .....	11
Gambar 2.4.	<i>Flat-walled diffuser</i> dan <i>Conical diffuser</i> .....	11
Gambar 2.5.	Pola aliran didalam <i>diffuser</i> : performa .....	12
Gambar 2.6.	Perbandingan garis awal <i>appreciable stall</i> dan garis maksimum $C_p$ pada <i>length ratio</i> konstan dalam <i>plane walled diffuser</i> dan <i>conical diffuser</i> .....	13
Gambar 2.7.	Kontur <i>pressure recovery</i> pada <i>conical diffuser</i> .....	14
Gambar 2.8.	Prediksi peta performa <i>conical diffuser</i> , $Re = 1.61 \times 10^5$ .....	15
Gambar 2.9.	Prediksi peta performa <i>conical diffuser</i> , $Re = 1.44 \times 10^5$ .....	15
Gambar 2.10.	Hubungan antara garis geometri optimum dan kondisi aliran .....	16
Gambar 2.11.	Skematik geometri model <i>diverging conical duct</i> .....	20
Gambar 2.12.	Visualisasi aliran <i>diverging conical duct</i> .....	21
Gambar 2.13.	<i>Length separation versus Upstream Re</i> .....	22
Gambar 2.14.	Pengaruh <i>Reynolds number</i> pada performa <i>conical diffuser</i> , $2\theta = 31.2^\circ$ , $N/R_1 = 4.0$ .....	22
Gambar 2.15.	Skema pengujian apparatus (Inlet dia. : $D = 2R = 125$ mm) .....	23
Gambar 2.16.	<i>Vortex generator jet hole</i> .....	23
Gambar 2.17.	Pengaruh VR terhadap $C_p$ dan $\zeta$ dalam <i>diffuser</i> $14^\circ$ dengan VGJ .....	24
Gambar 2.18.	Distribusi <i>pressure recovery</i> , $d = 6$ , $n = 8$ , $VR = 3.5$ , pada <i>center axis</i> .....	25
Gambar 2.19.	Bentuk profil <i>conical diffuser</i> dengan KVG .....	25
Gambar 2.20.	<i>Computational grid</i> pada <i>conical diffuser</i> dengan KVG .....	26
Gambar 2.21.	Perbandingan vorticity iso surface untuk URANS, DES, dan DDES .....	26
Gambar 2.22.	Visualisasi <i>time averaged flow</i> pada <i>symmetry plane</i> .....	27
Gambar 2.23.	Geometri <i>diffuser</i> tanpa <i>centre body</i> dan dengan <i>centre body</i> .....	28
Gambar 2.24.	Grafik <i>shape factor</i> ( $H$ ) untuk <i>half angle</i> $4.5^\circ$ dan $6^\circ$ .....	28
Gambar 2.25.	Grafik performa ( $C_p$ ) untuk <i>half angle</i> $4.5^\circ$ dan $6^\circ$ .....	29
Gambar 2.26.	Kontur kecepatan bidang $x/L_1 = 2$ di dalam <i>symmetric flat-walled diffuser</i> .....	30
Gambar 2.27.	Vektor kecepatan bidang melintang $x/L_1 = 2$ pada <i>diffuser</i> ( $2\theta_1$ ) = $12^\circ$ .....	30
Gambar 2.28.	Perbandingan distribusi <i>wall pressure coefficient</i> .....	31
Gambar 2.29.	Perbandingan <i>skin friction coefficient</i> .....	32
Gambar 3.1.	Geometri <i>conical diffuser</i> tanpa penambahan <i>vortex generator</i> ....	35
Gambar 3.2.	Geometri <i>vortex generator</i> ( <i>circular ring</i> ) .....	36
Gambar 3.3.	Model 3D <i>conical diffuser</i> dengan <i>vortex generator</i> pada GAMBIT .....	37
Gambar 3.4.	<i>Meshing</i> pada <i>conical diffuser</i> dengan <i>vortex generator</i> , $2\theta = 30^\circ$ , $AR = 2$ , 3D pada GAMBIT .....	38



Gambar 3.5.	<i>Boundary condition</i> pada model <i>conical diffuser</i> .....	39
Gambar 3.6.	Posisi pengambilan data untuk profil kecepatan dan intensitas turbulensi.....	42
Gambar 4.1.	Perbandingan distribusi kecepatan maksimum ( $U_{maks}$ ) model <i>conical diffuser</i> , $AR = 2$ , tanpa ( <i>baseline</i> ) dan dengan penambahan <i>vortex generator (modified)</i> untuk $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$ dan $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$ .....	44
Gambar 4.2.	Perbandingan distribusi kecepatan maksimum ( $U_{maks}$ ) model <i>conical diffuser</i> , $AR = 6$ , tanpa ( <i>baseline</i> ) dan dengan penambahan <i>vortex generator (modified)</i> untuk $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$ dan $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$ .....	46
Gambar 4.3.	Perbandingan distribusi kecepatan maksimum ( $U_{maks}$ ) model <i>conical diffuser</i> , $AR = 8$ , tanpa ( <i>baseline</i> ) dan dengan penambahan <i>vortex generator (modified)</i> untuk $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$ dan $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$ .....	47
Gambar 4.4.	Perbandingan profil kecepatan pada beberapa <i>cross section</i> $x/N$ , model <i>conical diffuser</i> , $AR = 2$ , tanpa ( <i>baseline</i> ) dan dengan penambahan <i>vortex generator (modified)</i> untuk $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$ .....	48
Gambar 4.5.	Perbandingan profil kecepatan pada beberapa <i>cross section</i> $x/N$ , model <i>conical diffuser</i> , $AR = 6$ , tanpa ( <i>baseline</i> ) dan dengan penambahan <i>vortex generator (modified)</i> untuk $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$ .....	48
Gambar 4.6.	Perbandingan profil kecepatan pada beberapa <i>cross section</i> $x/N$ , model <i>conical diffuser</i> , $AR = 8$ , tanpa ( <i>baseline</i> ) dan dengan penambahan <i>vortex generator (modified)</i> untuk $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$ .....	51
Gambar 4.7.	Perbandingan profil kecepatan pada beberapa <i>cross section</i> $x/N$ , model <i>conical diffuser</i> , $AR = 2$ , tanpa ( <i>baseline</i> ) dan dengan penambahan <i>vortex generator (modified)</i> untuk $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$ .....	51
Gambar 4.8.	Perbandingan profil kecepatan pada beberapa <i>cross section</i> $x/N$ , model <i>conical diffuser</i> , $AR = 6$ , tanpa ( <i>baseline</i> ) dan dengan penambahan <i>vortex generator (modified)</i> untuk $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$ .....	52
Gambar 4.9.	Perbandingan profil kecepatan pada beberapa <i>cross section</i> $x/N$ , model <i>conical diffuser</i> , $AR = 8$ , tanpa ( <i>baseline</i> ) dan dengan penambahan <i>vortex generator (modified)</i> untuk $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$ .....	53
Gambar 4.10.	Visualisasi kontur kecepatan model <i>conical diffuser</i> $AR = 2$ .....	54
Gambar 4.11.	Visualisasi vektor kecepatan model <i>conical diffuser</i> $AR = 2$ .....	55
Gambar 4.12.	Visualisasi kontur kecepatan model <i>conical diffuser</i> $AR = 6$ .....	57
Gambar 4.13.	Visualisasi kontur kecepatan model <i>conical diffuser</i> $AR = 8$ .....	57
Gambar 4.14.	Visualisasi vektor kecepatan model <i>conical diffuser</i> $AR = 6$ .....	58
Gambar 4.15.	Visualisasi vektor kecepatan model <i>conical diffuser</i> $AR = 8$ .....	59
Gambar 4.16.	Visualisasi kontur dan vektor kecepatan bidang bidang melintang ( $r-\theta$ ) di dalam model <i>conical diffuser</i> $AR = 2$ .....	61



Gambar 4.17.	Visualisasi kontur dan vektor kecepatan bidang bidang melintang ( $r-\theta$ ) di dalam model <i>conical diffuser</i> $AR = 6$ .....	62
Gambar 4.18.	Visualisasi kontur dan vektor kecepatan bidang bidang melintang ( $r-\theta$ ) di dalam model <i>conical diffuser</i> $AR = 8$ .....	63
Gambar 4.19.	Perbandingan distribusi intensitas turbulensi maksimum ( $TI_{maks}$ ) model <i>conical diffuser</i> , $AR = 2$ , tanpa ( <i>baseline</i> ) dan dengan penambahan <i>vortex generator (modified)</i> untuk $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$ dan $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$ .....	65
Gambar 4.20.	Perbandingan distribusi intensitas turbulensi maksimum ( $TI_{maks}$ ) model <i>conical diffuser</i> , $AR = 6$ , tanpa ( <i>baseline</i> ) dan dengan penambahan <i>vortex generator (modified)</i> untuk $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$ dan $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$ .....	66
Gambar 4.21.	Perbandingan distribusi intensitas turbulensi maksimum ( $TI_{maks}$ ) model <i>conical diffuser</i> , $AR = 8$ , tanpa ( <i>baseline</i> ) dan dengan penambahan <i>vortex generator (modified)</i> untuk $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$ dan $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$ .....	66
Gambar 4.22.	Perbandingan profil intensitas turbulensi pada beberapa <i>cross section</i> $x/N$ , model <i>conical diffuser</i> untuk $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$ .....	68
Gambar 4.23.	Perbandingan profil intensitas turbulensi pada beberapa <i>cross section</i> $x/N$ , model <i>conical diffuser</i> untuk $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$ .....	69
Gambar 4.24.	Visualisasi kontur intensitas turbulensi model <i>conical diffuser</i> $AR = 2$ .....	71
Gambar 4.25.	Visualisasi kontur intensitas turbulensi model <i>conical diffuser</i> $AR = 6$ .....	71
Gambar 4.26.	Visualisasi kontur intensitas turbulensi model <i>conical diffuser</i> $AR = 8$ .....	72
Gambar 4.27.	Distribusi <i>pressure coefficient</i> ( $C_p$ ), model <i>conical diffuser</i> , $AR = 2$ , tanpa ( <i>baseline</i> ) dan dengan penambahan <i>vortex generator (modified)</i> pada <i>sisi wall</i> .....	73
Gambar 4.28.	Distribusi <i>pressure coefficient</i> ( $C_p$ ), model <i>conical diffuser</i> , $AR = 6$ , tanpa ( <i>baseline</i> ) dan dengan penambahan <i>vortex generator (modified)</i> pada <i>sisi wall</i> .....	74
Gambar 4.29.	Distribusi <i>pressure coefficient</i> ( $C_p$ ), model <i>conical diffuser</i> , $AR = 8$ , tanpa ( <i>baseline</i> ) dan dengan penambahan <i>vortex generator (modified)</i> pada <i>sisi wall</i> .....	75
Gambar 4.30.	Distribusi <i>pressure coefficient</i> ( $C_p$ ), model <i>conical diffuser</i> , $AR = 2$ , tanpa ( <i>baseline</i> ) dan dengan penambahan <i>vortex generator (modified)</i> pada <i>sisi centerline</i> .....	77
Gambar 4.31.	Distribusi <i>pressure coefficient</i> ( $C_p$ ), model <i>conical diffuser</i> , $AR = 6$ , tanpa ( <i>baseline</i> ) dan dengan penambahan <i>vortex generator (modified)</i> pada <i>sisi centerline</i> .....	78
Gambar 4.32.	Distribusi <i>pressure coefficient</i> ( $C_p$ ), model <i>conical diffuser</i> , $AR = 8$ , tanpa ( <i>baseline</i> ) dan dengan penambahan <i>vortex generator (modified)</i> pada <i>sisi centerline</i> .....	79
Gambar 4.33.	Visualisasi kontur tekanan statis model <i>conical diffuser</i> $AR = 2$ ..	82
Gambar 4.34.	Visualisasi kontur tekanan statis model <i>conical diffuser</i> $AR = 6$ ..	82
Gambar 4.35.	Visualisasi kontur tekanan statis model <i>conical diffuser</i> $AR = 8$ ..	83



Gambar 4.36. <i>Total pressure losses coefficient</i> pada model <i>conical diffuser</i> untuk sudut divergensi besar .....	84
Gambar 4.37. Perbandingan distribusi <i>skin friction coefficient</i> ( $C_f$ ) model <i>conical diffuser</i> , $AR = 2$ , tanpa ( <i>baseline</i> ) dan dengan penambahan <i>vortex generator (modified)</i> .....	87
Gambar 4.38. Perbandingan distribusi <i>skin friction coefficient</i> ( $C_f$ ) model <i>conical diffuser</i> , $AR = 6$ , tanpa ( <i>baseline</i> ) dan dengan penambahan <i>vortex generator (modified)</i> .....	89
Gambar 4.39. Perbandingan distribusi <i>skin friction coefficient</i> ( $C_f$ ) model <i>conical diffuser</i> , $AR = 8$ , tanpa ( <i>baseline</i> ) dan dengan penambahan <i>vortex generator (modified)</i> .....	89
Gambar 4.40. <i>Meshing</i> disekitar <i>inlet diffuser</i> .....	90
Gambar 4.41. Posisi <i>center gravity</i> pada <i>cell</i> sebelum dan sesudah <i>inlet diffuser</i> .....	91
Gambar 4.42. Perbandingan area separasi berdasarkan variasi bilangan <i>Reynolds</i> pada model <i>conical diffuser</i> dengan sudut divergensi ( $2\theta$ ) = $30^\circ$ .....	92



## DAFTAR SIMBOL

Simbol geometri dari *conical diffuser* :

- $L_1$  : panjang *upstream channel*, mm
- $L_2$  : panjang *downstream channel*, mm
- $N$  : panjang *diffuser*, mm
- $D_1$  : diameter *inlet diffuser*, mm
- $D_2$  : diameter *outlet diffuser*, mm
- $\theta$  : sudut divergensi 1
- $x$  : sumbu horizontal
- $x/N$  : posisi horizontal tak berdimensi
- $y$  : sumbu vertical
- $y/N$  : posisi vertikal tak berdimensi
- $z$  : sumbu melintang

$C_f$  : *skin friction coefficient*, ( $C_f = \frac{\tau_w}{0,5 \times \rho \times U_{ref}^2}$ ), tak berdimensi

$C_p$  : *wall pressure coefficient* ( $C_p = \frac{P_{s,i} - P_{ref}}{0,5 \times \rho \times U_{ref}^2}$ ), tak berdimensi

$C_{p_r}$  : *pressure recovery coefficient*,  
 $(C_{p_r} = \frac{p_{s,e} - p_{s,0}}{\frac{1}{2} \rho U_{ref}^2})$ , tak berdimensi

$\zeta$  : *total pressure loss coefficient*, ( $\zeta = \frac{p_{02} - p_{01}}{\frac{1}{2} \rho U^2}$ ), tak berdimensi

$p_{01}$  : tekanan total *inlet diffuser*, Pa

$p_{02}$  : tekanan total *outlet diffuser*, Pa

$p_{s,i}$  : tekanan statis dinding pada  $x/N = i$ , Pa

$p_{s,1}$  : tekanan statis pada *inlet diffuser*, Pa

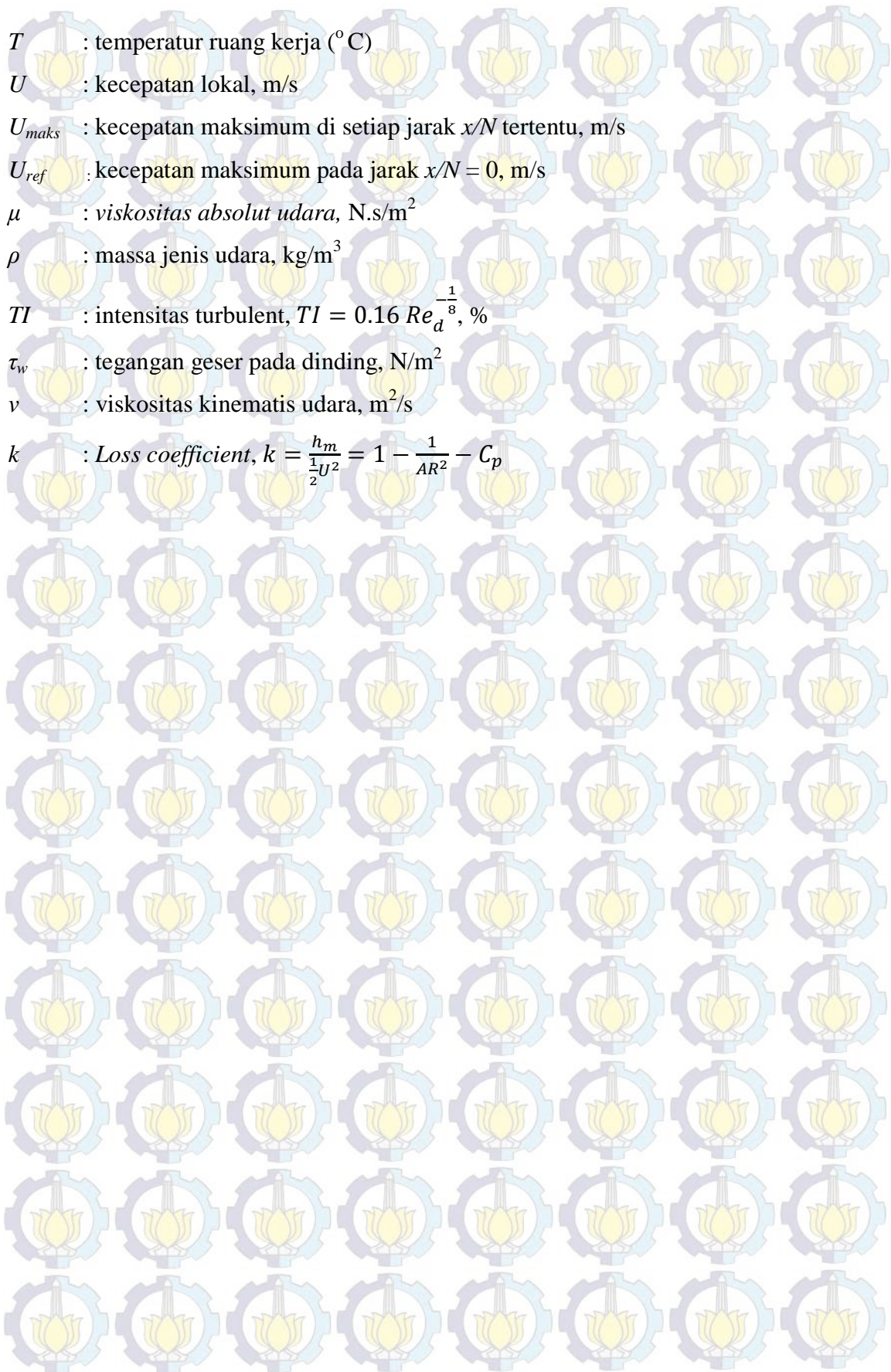
$p_{s,2}$  : tekanan statis pada *outlet diffuser*, Pa

$\Delta p$  : perbedaan tekanan stagnasi dengan statis dinding, Pa

$\Delta p^+$  : *normalized differential pressure*

$Re_{D1}$  : bilangan *Reynolds* berdasarkan diameter *inlet diffuser*,  $Re_{D1} = \frac{\rho U D_1}{\mu}$ ,  
 bilangan tak berdimensi





$T$  : temperatur ruang kerja ( $^{\circ}\text{C}$ )

$U$  : kecepatan lokal, m/s

$U_{maks}$  : kecepatan maksimum di setiap jarak  $x/N$  tertentu, m/s

$U_{ref}$  : kecepatan maksimum pada jarak  $x/N = 0$ , m/s

$\mu$  : viskositas absolut udara, N.s/m<sup>2</sup>

$\rho$  : massa jenis udara, kg/m<sup>3</sup>

$TI$  : intensitas turbulent,  $TI = 0.16 Re_d^{-\frac{1}{8}}$ , %

$\tau_w$  : tegangan geser pada dinding, N/m<sup>2</sup>

$\nu$  : viskositas kinematis udara, m<sup>2</sup>/s

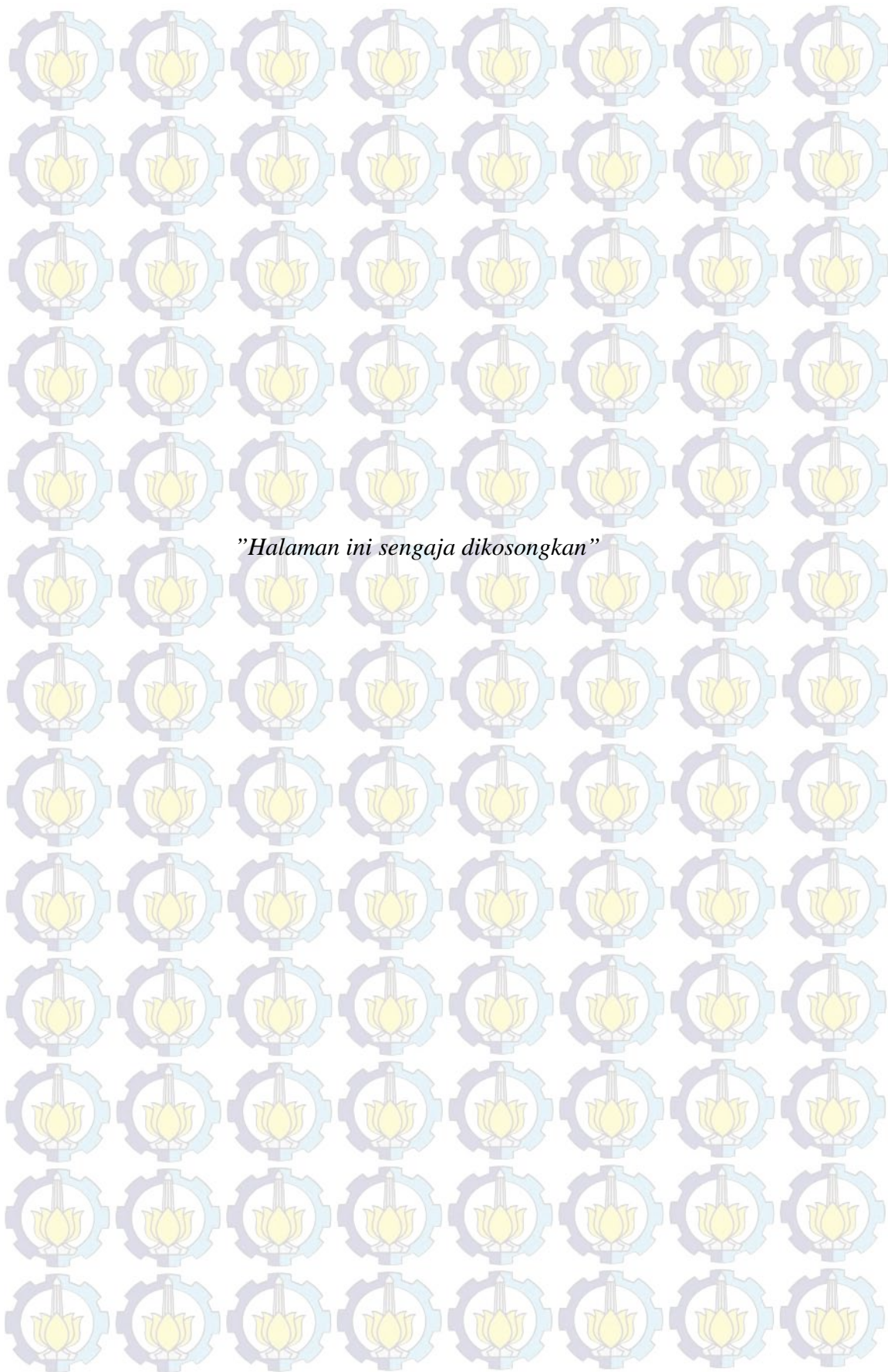
$k$  : Loss coefficient,  $k = \frac{h_m}{\frac{1}{2}U^2} = 1 - \frac{1}{AR^2} - C_p$



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Karakteristik <i>conical diffuser</i> optimum ( $2\theta = 10^\circ - 14^\circ$ ).....	19
Tabel 2.2. Kondisi Eksperimen.....	23
Tabel 2.3. Klasifikasi performa dan <i>total pressure recovery</i> pada <i>conical diffuser</i> dengan variasi KVG .....	27
Tabel 2.4. Data perbandingan antara penelitian terdahulu dengan penelitian yang akan dilakukan sekarang .....	32
Tabel 3.1. Analisa <i>grid independency total pressure</i> pada posisi ( $x/N = 1$ ).....	41
Tabel 4.1. Posisi <i>separation point</i> pada model <i>conical diffuser</i> tanpa dan dengan <i>vortex generator</i> variasi <i>area ratio</i> (AR) dan bilangan <i>Reynolds</i> ( $Re_{D1}$ ).....	60
Tabel 4.2. Perbandingan nilai $C_{pr}$ dan $C_{p_{maks}}$ untuk model <i>baseline</i> dan <i>modified conical diffuser</i> ( $2\theta_1 = 30^\circ$ ) .....	80
Tabel 4.3. <i>Total pressure losses coefficient</i> pada model <i>conical diffuser</i> tanpa dan dengan <i>vortex generator</i> .....	85
Tabel 4.4. <i>Loss coefficient</i> ( $k$ ) pada model <i>conical diffuser</i> .....	86
Tabel 4.5. Perbandingan nilai $C_{pr}$ .....	93
Tabel 5.1. Penundaan separasi sejauh $\Delta x/N$ pada model <i>conical diffuser</i> .....	95
Tabel 5.2. Hubungan <i>pressure recovery coefficient</i> ( $C_{pr}$ ) dan <i>loss coefficient</i> ( $k$ ).....	96







# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Kebutuhan aplikasi teknologi dan ilmu pengetahuan yang bertujuan untuk menghemat energi semakin meningkat. Diiringi oleh perkembangan teknologi dan ilmu pengetahuan yang sangat pesat memacu berbagai pihak untuk mengembangkan hal tersebut dan menciptakan penemuan baru yang bermanfaat. Salah satu upaya yang dilakukan ialah dengan mengkaji bidang ilmu mekanika fluida melalui analisa pola perilaku aliran fluida di dalam sebuah *diffuser*. Hal ini dimaksudkan agar diperoleh performa *diffuser* yang bagus, karena *diffuser* adalah salah satu alat yang memegang peranan penting sebagai pendukung proses dalam dunia industri.

Contoh penggunaan *diffuser* diantaranya pada *Heat Recovery Steam Generator (HRSG)* pada pembangkit listrik PLTGU, *Heating, Ventilating, and Air Conditioning (HVAC) system*, *centrifugal compressor*, *centrifugal pump* yang berada pada sisi luar *impeller*, *jet engine*, serta *wind tunnel*. Tujuan penggunaan *diffuser* tergantung kebutuhan sehingga pemilihan bentuk *diffuser* sangat penting dalam penyesuaian performa dan karakteristik fluida yang mengalir didalamnya.

*Diffuser* dirancang sebagai alat yang dapat mengkonversi energi kinetik menjadi energi potensial dalam bentuk tekanan. *Diffuser* merupakan sebuah saluran tertutup dengan penampang melintang yang membesar sepanjang arah aliran. Aliran utama (*mainstream*) pada *diffuser* mengalami perlambatan diikuti dengan timbulnya tegangan geser pada dinding dan peningkatan tekanan searah dengan aliran yang menyebabkan adanya gradien tekanan positif atau disebut juga *adverse pressure gradient (APG)*. Akumulasi tegangan geser menyebabkan momentum aliran terus berkurang sampai suatu saat momentum aliran tersebut tidak mampu lagi melawan *adverse pressure gradient* dan efek *friction* sehingga menyebabkan aliran terpisah dari kontur. Fenomena tersebut dinamakan separasi aliran. Separasi aliran menyebabkan nilai *pressure recovery coefficient* ( $C_{pr}$ ) menjadi rendah atau bahkan drop dikarenakan oleh *APG* yang sangat besar



sehingga berdampak pada penurunan performa *diffuser*. Dimana  $C_{p_r}$  merupakan salah satu parameter penentu kondisi performa suatu *diffuser*, yang nilainya sebanding dengan selisih antara tekanan lokal dan tekanan *freestream* tetapi berbanding terbalik dengan tekanan dinamis.

Usaha untuk menunda separasi aliran telah banyak dikaji oleh peneliti-peneliti terdahulu. **McDonald dan Fox** [1] mengevaluasi aliran *incompressible* dalam *conical diffuser* dengan variasi sudut divergensi ( $2\theta$ ) dan *area ratio* ( $AR$ ) pada *Reynolds number inlet* konstan yang dirangkum dalam peta kestabilan performa *conical diffuser* dalam distribusi *pressure coefficient* ( $C_p$ ). Tipe *conical diffuser* dapat didesain untuk *pressure recovery coefficient* yang maksimal dibandingkan tipe *flat walled diffuser* karena tipe ini adalah yang paling memungkinkan untuk tidak terjadi separasi. **Sparrow dkk** [2] mengevaluasi fenomena separasi pada visualisasi *diverging conical duct* yang diindikasikan tidak hanya karena besarnya sudut divergensi tetapi juga karena besarnya kontribusi *Reynolds number*. Pada sudut divergensi sebesar  $5^\circ$ , separasi terjadi pada *Reynolds number* rendah ( $Re \leq 2000$ ), sedangkan pada sudut  $10^\circ$  dan  $30^\circ$ , separasi terjadi pada semua variasi *Reynolds number*. **Lee dkk** [3] melakukan pengamatan terhadap struktur *turbulence* dalam kategori *mean velocity profile* dan *Reynolds stress* pada *conical diffuser*. Selain itu juga mengevaluasi tingkat *adverse pressure gradient* ( $APG$ ) dalam distribusi *skin friction coefficient* ( $C_f$ ), distribusi *pressure coefficient* ( $C_p$ ), *nondimensionalized pressure gradient parameter* ( $P^+$ ), dan *Clauser's nondimensionalized pressure gradient parameter* ( $\beta$ ). Seiring dengan meningkatnya sudut divergensi akan meningkatkan  $APG$  yang berdampak pada peningkatan nilai  $C_p$  dan penurunan nilai  $C_f$ .  $P^+$  dan  $\beta$  memiliki pola distribusi profil yang sama  $C_p$ , namun mengalami peningkatan drastis pada sudut divergensi  $8^\circ$ . Akan tetapi  $\beta$  memiliki deviasi yang sangat kecil terhadap sudut divergensi.

Selain usaha diatas, untuk menunda ataupun mengeliminasi separasi dilakukan dengan tindakan yang berbeda yaitu dengan penambahan *vortex generator*. *Vortex generator* berfungsi membuat aliran menjadi lebih turbulen untuk meningkatkan momentum aliran agar mampu melawan *adverse pressure gradient* dan efek *friction*. Evaluasi *vortex generator* yang diaplikasi pada *conical*



*diffuser* memiliki dampak yang positif dalam meningkatkan performa *diffuser*. Nishi dkk [4] mengkaji distribusi *pressure recovery coefficient* ( $C_{pr}$ ) dan *loss coefficient* ( $\zeta$ ) terhadap *velocity ratio* ( $VR$ ) pada *conical diffuser* tanpa dan dengan penambahan *vortex generator jet* ( $VGJ$ ).  $VGJ$  yang digunakan bervariasi berdasarkan ukuran *jet hole* dan jumlah *jet* yang digunakan agar didapatkan  $VGJ$  yang sesuai untuk peningkatan performa *conical diffuser* dengan sudut divergensi  $14^\circ$ . Xie dkk [5] juga meneliti  $VGJ$  dengan geometri *conical diffuser* yang sama dengan [5] yang disajikan dalam distribusi  $C_p$  pada  $Re = 66160, 82700$ , dan  $99240$ , visualisasi kontur *vorticity*, dan vektor kecepatan.  $VGJ$  menggunakan metode kontrol aktif terhadap separasi aliran terkait didalam *turbulent boundary layer*. Zhang dkk [6] mengevaluasi *vortex generator* yang berbeda. *Karman vortex generator* ( $KVG$ ) mengadopsi metode kontrol pasif terhadap separasi aliran.  $KVG$  dimodelkan pada *conical diffuser* dengan sudut divergensi  $(2\theta) = 29.14^\circ$  dan  $AR = 3.533$ . Bentuk dari  $KVG$  berupa *circular ring*. Dengan membandingkan metode analisa simulasi *unsteady model* ( $URANS$ ,  $DES$ , dan  $DDES$ ), variasi dimensi dan lokasi  $KVG$  didapatkan dimensi, lokasi  $KVG$  dan metode yang tepat untuk mendapatkan performa *conical diffuser* yang paling baik.

Tipe *diffuser* sangat beragam, contohnya *axisymmetric and symmetric flat walled*, *conical*, *annular*, dan lain-lain. Dalam penelitian ini tipe *diffuser* yang akan diulas secara lengkap berdasarkan hasil evaluasi penelitian diatas yaitu tipe *conical diffuser* tanpa dan dengan pengaruh penambahan *vortex generator* ( $VG$ ), variasi posisi peletakan  $VG$ , variasi ukuran  $VG$  dan variasi *Reynolds number* sebagai upaya meningkatkan performa *conical diffuser* dengan menunda ataupun mengeliminasi terjadinya separasi.

## 1.2. Rumusan Masalah

Beberapa faktor yang mengindikasikan menurunnya performa *conical diffuser* telah dijelaskan di atas, yaitu semakin besar sudut divergensi ataupun konfigurasi geometri *diffuser* lainnya (*area ratio*), berdampak terhadap peningkatan  $APG$  sehingga memicu separasi aliran yang berdampak pada nilai *pressure coefficient* ( $C_p$ ) dan *pressure recovery coefficient* ( $C_{pr}$ ) yang turun secara drastis.



Salah satu upaya untuk meningkatkan performa *conical diffuser* adalah dengan meningkatkan bilangan *Reynolds* aliran [2]. Pada *conical diffuser* dengan sudut divergensi besar, bila turbulensi ditingkatkan maka akan meningkatkan momentum aliran untuk melawan APG dan efek gesekan. Efek dari hal ini adalah separasi akan tertunda dan daerah *wake* yang terbentuk semakin sempit. Upaya untuk meningkatkan turbulensi tersebut adalah dengan penambahan *vortex generator* (*circular ring*). Pada penelitian ini *vortex generator* digunakan pada sudut divergensi konstan dengan variasi *Reynolds number* dan variasi *area ratio*.

Permasalahan terkait dengan aliran didalam *conical diffuser* adalah bagaimana perbandingan model tanpa dan dengan pengaruh penambahan *vortex generator* terhadap beberapa parameter yang ditinjau yaitu :

1. Distribusi *pressure coefficient* ( $C_p$ ), *pressure recovery coefficient* ( $C_{p_r}$ ), dan *total pressure loss coefficient* ( $\zeta$ ),
2. Distribusi *skin friction coefficient* ( $C_f$ ),
3. Perubahan profil kecepatan dan intensitas turbulensi, dan
4. Struktur aliran sekunder.

### 1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengkaji perubahan terhadap nilai  $C_{p_r}$  di dalam *conical diffuser* pada sudut divergensi konstan ( $2\theta$ ) =  $30^\circ$  dengan variasi bilangan *Reynolds* yang digunakan,  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$  dan  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$  serta variasi *area ratio* yaitu  $AR = 2, 6$  dan  $8$  yang menggunakan metode simulasi numerik 3D. Secara garis besar, tujuan penelitian ini adalah melakukan analisa perbandingan model tanpa dan dengan pengaruh penambahan *vortex generator* terhadap beberapa parameter yang ditinjau yaitu :

1. Distribusi *pressure coefficient* ( $C_p$ ), *pressure recovery coefficient* ( $C_{p_r}$ ), dan *total pressure loss coefficient* ( $\zeta$ ),
2. Distribusi *skin friction coefficient* ( $C_f$ ),
3. Perubahan profil kecepatan dan intensitas turbulensi, dan
4. Visualisasi aliran sekunder berdasarkan *vector velocity* pada bidang  $yz$  dan visualisasi aliran *contour static pressure*, *velocity*, dan intensitas turbulensi.

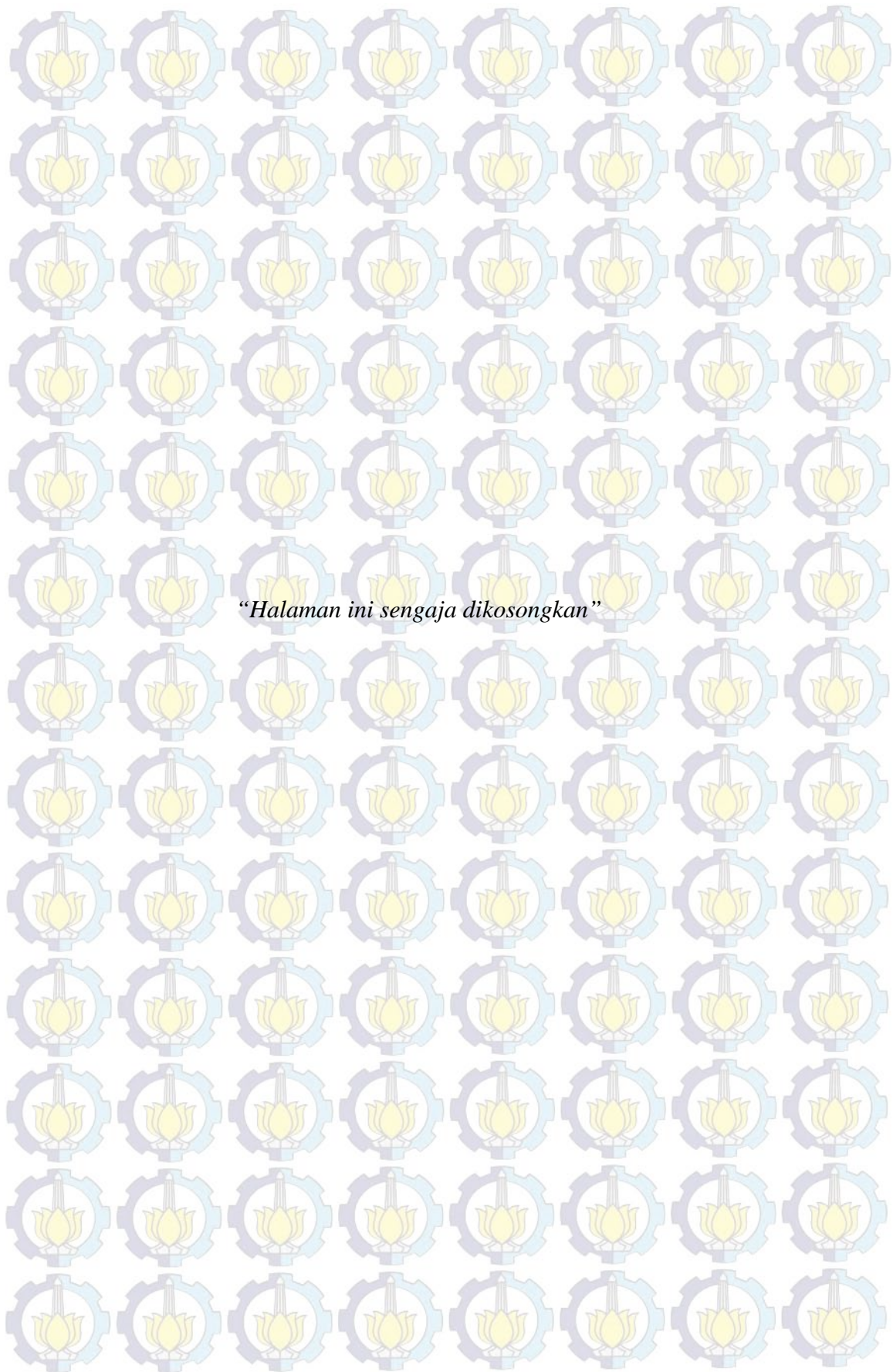


#### 1.4. Batasan Masalah

Agar ruang lingkup penelitian ini tidak melebar dari tujuan penelitian, maka dibutuhkan beberapa batasan masalah, yaitu:

1. Kondisi aliran pada *inlet test section* adalah *steady*, *incompressible* dan *viscous*.
2. Aliran yang diamati adalah kasus aliran turbulen.
3. Arah aliran *uniform* di sisi masuk *test section*.
4. Efek perpindahan panas akibat aliran fluida dalam *diffuser* dapat diabaikan.
5. Pengaruh kekasaran permukaan pada dinding *diffuser* dianggap *smooth wall*.







## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

Penelitian mengenai aliran internal melintasi *conical diffuser* dengan variasi geometri ataupun penambahan *vortex generator* memiliki tujuan yang sama yaitu untuk peningkatan performa *diffuser* telah dilakukan sebelumnya. Penelitian dilakukan secara simulasi numerik. Penjabaran teori mengenai geometri *diffuser*, konsep *boundary layer* yang meliputi pengaruh *pressure gradient* terhadap kondisi *boundary layer* menjadi landasan dalam penelitian ini. Beberapa penelitian menjadi referensi penelitian ini, terkait dengan peningkatan performa *conical diffuser* dan karakteristik *boundary layer* melewati *conical diffuser* tanpa ataupun dengan penambahan *vortex generator* dalam penelitian eksperimen maupun numerik.

#### 2.1. Konsep *Boundary Layer*

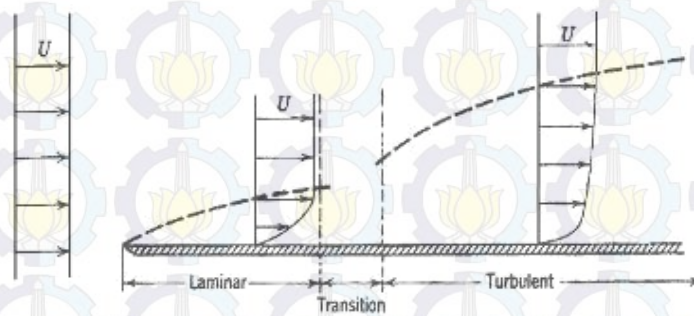
*Boundary layer* adalah lapisan tipis di atas bidang aliran membentuk distribusi kecepatan karena adanya pengaruh viskositas aliran yang mengalir di atas bidang aliran. *Fluid boundary layer* pertama kali dikemukakan oleh **Ludwig Prandtl** pada tahun 1904. Menurut Prandtl, daerah aliran yang terjadi di sekitar *solid surface* dibagi menjadi dua daerah, yaitu daerah di dalam *boundary layer* dimana masih terpengaruh adanya tegangan geser dan daerah di luar *boundary layer* dimana efek viskositas diabaikan (*inviscid flow*). *Boundary layer* didefinisikan sebagai daerah tipis pada aliran yang berbatasan dengan permukaan solid dimana ada pengaruh efek viskositas yang besar menyebabkan profil kecepatan didalamnya tidak uniform. Pengertian lain mengenai *boundary layer* yaitu sebagai lapis batas yang memisahkan antara daerah *freestream* dengan daerah yang masih dipengaruhi oleh gaya gesek.

Apabila ditinjau dari *regime* aliran, *boundary layer* dapat dibedakan menjadi dua bagian yaitu *laminar boundary layer* dan *turbulent boundary layer*. Di dalam aliran *boundary layer*, proses peralihan dari *boundary layer* laminar ke turbulen disebut sebagai keadaan transisi. Faktor yang mempengaruhi lamanya



proses transisi adalah gradien tekanan, kekasaran permukaan, perpindahan panas, gaya bodi dan gangguan aliran bebas [7].

Proses pembentukan lapisan batas yang mengalami transisi di atas sebuah plat datar ditunjukkan pada gambar 2.1. Ketika aliran melintasi pelat datar, partikel-partikel fluida yang cukup dekat terhadap pelat dihambat oleh adanya tegangan geser. Lapisan batas menebal searah dengan aliran. Begitu lapisan batas mulai menebal, ketidakstabilan pun terjadi dan mengakibatkan percampuran partikel (gerak acak) dan pertukaran momentum dalam fluida hingga menyebabkan terbentuknya lapisan batas turbulen. Pada lapisan batas turbulen, profil kecepatan yang terbentuk lebih tebal (gemuk) dengan gradien kecepatan di permukaan pelat dan tegangan gesernya lebih tinggi daripada kondisi *laminar* maupun transisi.



**Gambar 2.1** *Boundary layer* laminar dan turbulen sepanjang pelat datar [7]

### **2.1.1. Pengaruh *pressure gradient* terhadap kondisi *boundary layer***

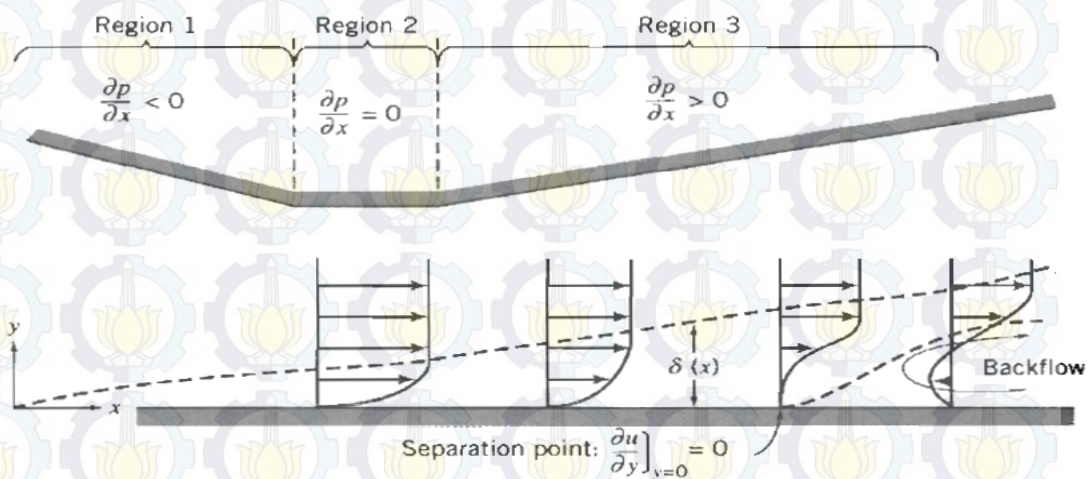
Aliran yang melewati bidang dimana terjadi perubahan luasan penampang akan mengalami perubahan tekanan di sepanjang aliran. Dengan adanya perubahan tekanan (*pressure gradient*) yang seiring dengan bertambahnya jarak maka akan berpengaruh pada kondisi *boundary layer*. Pada gambar 2.2 ditunjukkan bagaimana pengaruh *pressure gradient* terhadap kondisi *boundary layer*. Daerah *pressure gradient* (*pressure gradient region*) dibagi menjadi tiga bagian yaitu:

- *Region 1 (favorable pressure gradient)*, merupakan daerah terjadinya penurunan tekanan dikarenakan adanya pengecilan luas penampang yang



berdampak pada peningkatan kecepatan fluida sehingga gradien tekanan yang terjadi negatif,  $\left(\frac{\partial p}{\partial x} < 0\right)$ .

- *Region 2 (zero pressure gradient)*, merupakan daerah yang memiliki luas penampang yang konstan (*constant area*) sehingga gradien tekanan bernilai nol,  $\left(\frac{\partial p}{\partial x} = 0\right)$ , namun tidak menyebabkan aliran fluida berhenti.
- *Region 3 (adverse pressure gradient)*, merupakan daerah terjadinya penurunan kecepatan karena membesarnya luas penampang sehingga akan terjadi peningkatan tekanan dan gradien tekanannya menjadi positif,  $\left(\frac{\partial p}{\partial x} > 0\right)$ .



**Gambar 2.2.** Perkembangan *boundary layer* akibat pengaruh *pressure gradient* [7]

Apabila aliran bergerak melewati region 3, maka *adverse pressure gradient* yang terjadi akan semakin besar, sampai pada suatu titik tertentu fluida tidak mampu lagi melawan *adverse pressure gradient* dan tegangan geser sehingga terbentuklah separasi. Titik dimana terjadi peristiwa awal pemisahan aliran dari permukaan kontur ( $\tau_w = 0$ ) disebut titik separasi. Jika aliran yang terseparasi tersebut terus mengalir maka akan mengakibatkan terjadinya aliran balik (*back flow*).

Aliran turbulen memiliki profil lebih uniform dibandingkan dengan aliran laminar. Bentuk profil aliran turbulen menyebabkan momentum aliran di dekat dinding lebih besar. Hal ini berkontribusi dalam penundaan separasi karena aliran akan lebih tahan terhadap tegangan geser dan *adverse pressure gradient*. Selain



itu profil aliran turbulen dipengaruhi pula oleh kekasaran permukaan. Dimana semakin besar nilai kekasaran permukaan maka semakin besar pula nilai tegangan gesernya. Hal itulah yang mengikis momentum aliran dalam menahan *adverse pressure gradient* sehingga aliran menjadi mudah terseparasi.

### 2.1.2 Karakteristik *Boundary Layer*

Karakteristik *boundary layer* yang terbentuk dapat dinyatakan dengan besaran-besaran sebagai berikut:

a) *Disturbance Thickness* ( $\delta$ )

*Disturbance thickness* atau juga disebut sebagai ketebalan lapis batas didefinisikan sebagai jarak normal yang diukur dari permukaan benda padat hingga suatu titik dimana kecepatan aliran adalah  $0.99U$ . Karena profil kecepatan berkembang secara halus dan asimtotik terhadap *freestream* maka ketebalan lapis batas sulit diukur secara tepat.

b) *Displacement Thickness* ( $\delta^*$ )

Gaya-gaya *viscous* yang menghambat aliran dalam *boundary layer* menyebabkan laju alir massa dengan adanya lapis batas lebih sedikit daripada laju alir massa tanpa adanya lapis batas. *Displacement thickness* ( $\delta^*$ ) adalah jarak dimana batas permukaan harus dipindahkan secara imajiner dalam aliran tanpa gesekan sehingga memberikan laju alir massa yang setara dengan penurunan laju alir massa yang terjadi akibat adanya lapis batas dan dinyatakan dengan persamaan 2.1 sebagai berikut:

$$\delta^* = \int_0^\delta \left(1 - \frac{u}{U_\infty}\right) dy \quad (2.1)$$

c) *Momentum Thickness* ( $\theta^*$ )

Sifat gaya-gaya *viscous* yang menghambat aliran dalam lapis batas juga mengakibatkan pengurangan fluks momentum jika dibandingkan dengan aliran *inviscid*. *Momentum thickness* ( $\theta^*$ ) didefinisikan sebagai ketebalan dari suatu lapisan fluida dengan kecepatan  $U$  dimana fluks momentumnya sama dengan pengurangan fluks momentum melalui lapis batas dan dinyatakan dengan persamaan 2.2 sebagai berikut:

$$\theta^* = \int_0^\delta \frac{u}{U_\infty} \left(1 - \frac{u}{U_\infty}\right) dy \quad (2.2)$$

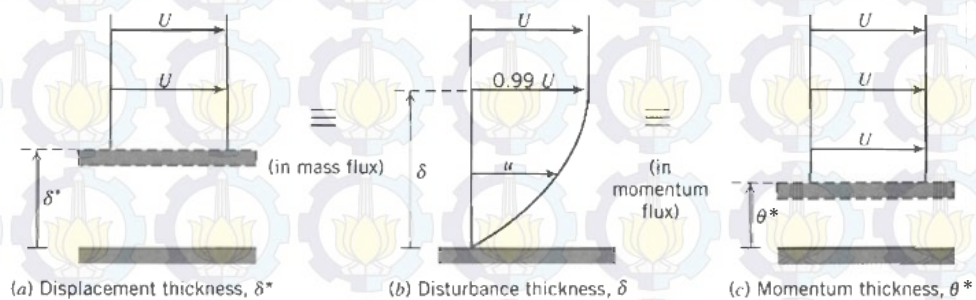


d) *Shape Factor (H)*

*Shape factor* adalah perbandingan antara *displacement thickness* dengan *momentum thickness* dan dinyatakan dengan persamaan 2.3 sebagai berikut:

$$H = \frac{\delta^*}{\theta^*} \quad (2.3)$$

Definisi *disturbance thickness* ( $\delta$ ), *displacement thickness* ( $\delta^*$ ) dan *momentum thickness* ( $\theta^*$ ) dapat diilustrasikan seperti gambar 2.3.



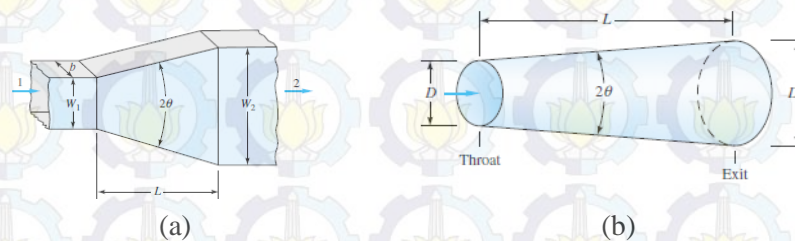
**Gambar 2.3** Definisi ketebalan *boundary layer*, *displacement thickness* dan *momentum thickness* [7]

## 2.2. Geometri Diffuser

*Diffuser* adalah suatu saluran yang memiliki penampang dengan pembesaran luas penampang secara gradual. Berdasarkan bentuk penampangnya *diffuser* dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu:

- *Flat-walled Diffuser*
- *Conical Diffuser*

Pada gambar 2.4 ditunjukkan bentuk *diffuser flat* dan *conical* beserta variabel yang mewakili geometri penting dari *diffuser* tersebut.



**Gambar 2.4** (a) *Flat-walled diffuser* dan (b) *Conical diffuser* [8]

Variabel geometri yang sangat berperan terhadap performa *diffuser* adalah sudut divergensi ( $2\theta$ ), panjang ( $N$ ), dan *area ratio* (perbandingan luas penampang



area *outlet* dan *inlet*). Hubungan antara variabel geometri tersebut terangkum dalam persamaan 2.4 dimana definisi *area ratio* terangkum dalam persamaan 2.5.

$$AR = \left(1 + \frac{N}{R_1} \tan \theta\right)^2, \quad (2.4)$$

$$AR = \frac{A_2}{A_1}, \quad (2.5)$$

dimana:

$AR$  : *area ratio*

$N$  : panjang *diffuser*

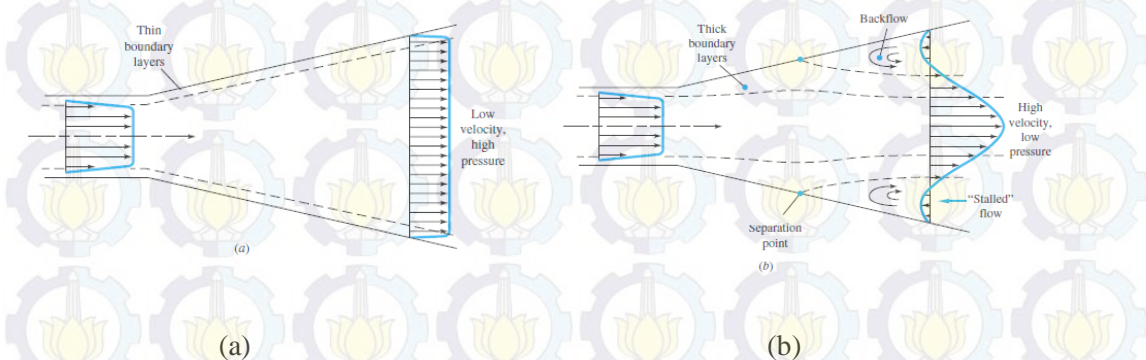
$R_1$  : Jari-jari *inlet diffuser*

$\theta$  : setengah sudut divergensi

$A_2$  : luasan penampang *outlet diffuser*

$A_1$  : luasan penampang *inlet diffuser*

Performa *diffuser* dapat dikatakan baik apabila dapat menghasilkan *pressure recovery coefficient* yang maksimum dan tidak terjadi separasi di dalamnya seperti yang ditunjukkan gambar 2.5.

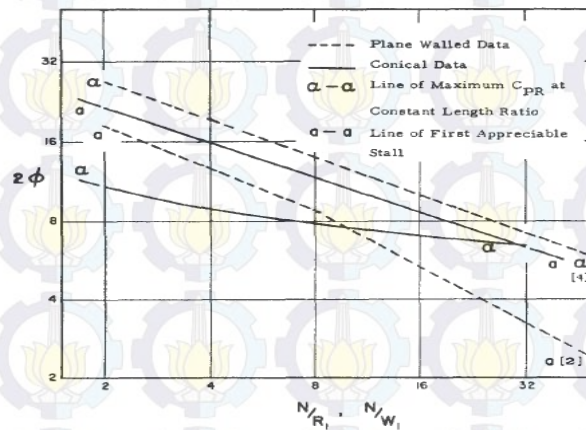


**Gambar 2.5** Pola distribusi aliran yang menunjukkan performa *diffuser*: (a) performa yang bagus dan (b) performa yang buruk dengan adanya separasi dan *backflow* [8]

Pemetaan performa *conical diffuser* (*conical diffuser performance map*) pertama kali dilakukan oleh McDonald dan Fox [1] secara eksperimen



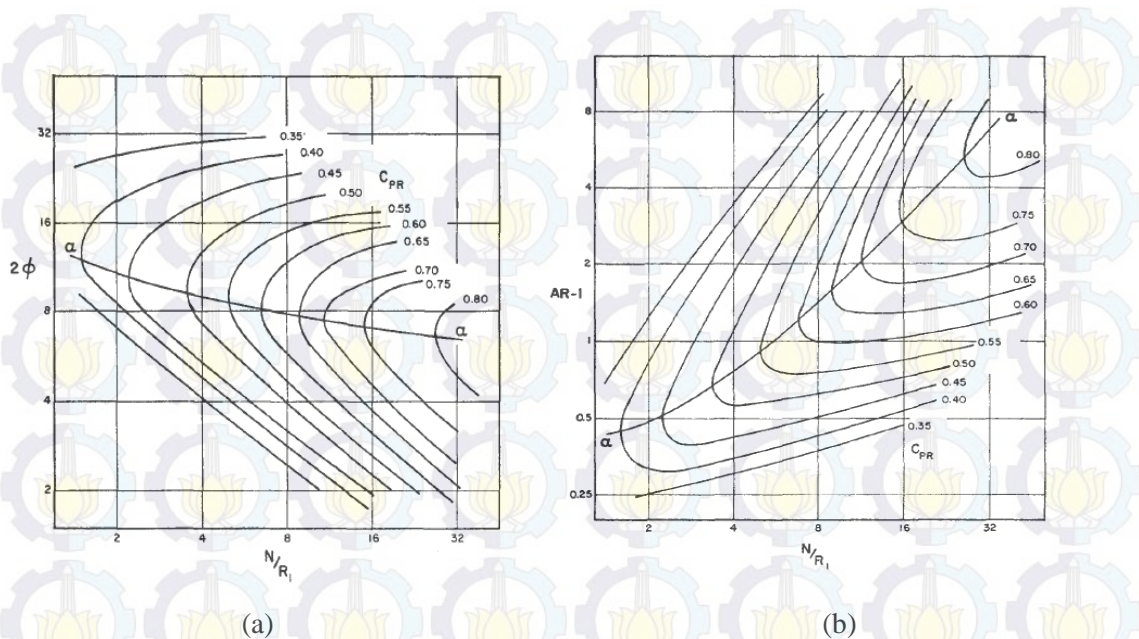
menggunakan fluida berupa air dengan  $Re$  konstan ( $Re = 1.25 \times 10^5$ ). Pada gambar 2.6 ditunjukkan perbandingan garis awal *appreciable stall* (a-a kecil) dan garis maksimum *pressure recovery coefficient* (a-a besar) pada *length ratio* konstan dalam *plane walled diffuser* dan *conical diffuser*. Garis maksimum  $C_{PR}$  *conical diffuser* berada dibawah garis awal *appreciable stall*. Daerah yang terbentuk oleh kedua garis ini semakin mengecil seiring dengan peningkatan  $N/R_1$  dan berpotongan pada  $N/R_1 = 32$ . Hal ini menunjukkan bahwa *conical diffuser* dapat dirancang untuk performa maksimum yang bebas dari berbagai *stall* yang mempengaruhi aliran secara signifikan.



**Gambar 2.6** Perbandingan garis awal *appreciable stall* dan garis maksimum  $C_{PR}$  pada *length ratio* konstan dalam *plane walled diffuser* dan *conical diffuser* [1]

Gambar 2.7 menunjukkan peningkatan *pressure recovery* seiring dengan peningkatan  $N/R_1$ , sudut divergensi ( $2\theta$ ) dan *area ratio* ( $AR$ ). Terlihat bahwa performa *diffuser* paling buruk diindikasikan oleh nilai  $C_{PR}$  yang paling rendah sebesar 0.35 terjadi pada konfigurasi  $N/R_1 < 16$  untuk  $0 < (2\theta) < 10$  dan  $(2\theta) > 16$ . Fenomena berbeda yang ditunjukkan gambar 2.6 (b), nilai  $C_{PR}$  terendah terjadi pada konfigurasi  $N/R_1 \leq 16$  untuk  $0 < (AR) < 12$ .

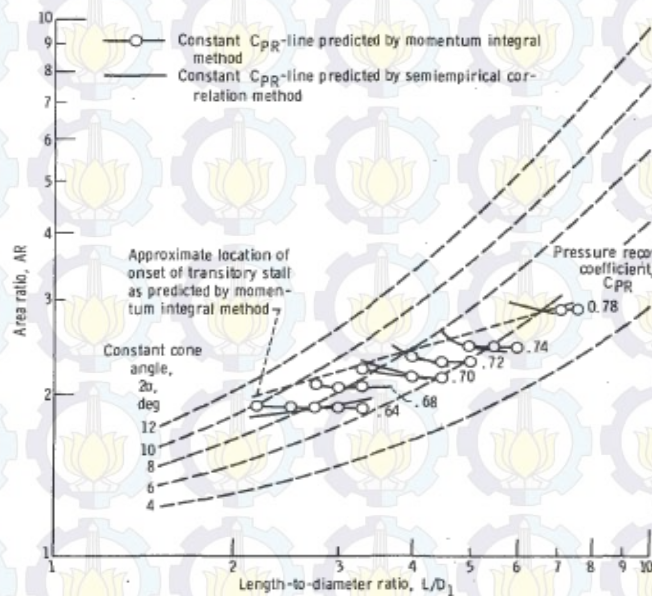




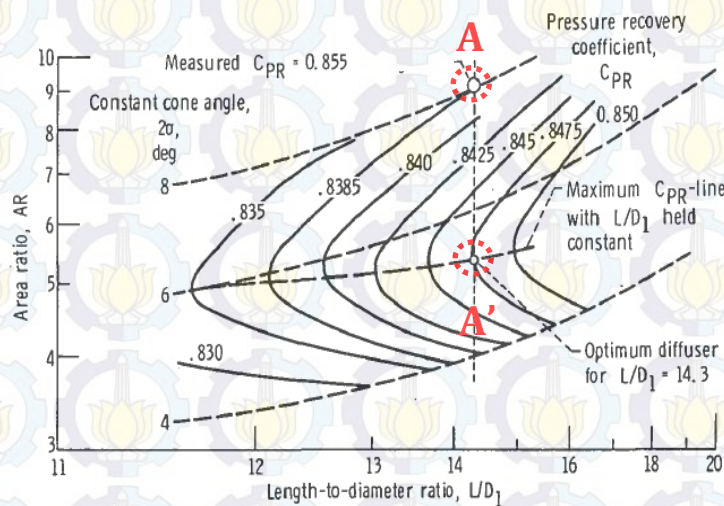
Gambar 2.7 Kontur *pressure recovery* pada *conical diffuser* : (a) berdasarkan sudut divergensi ( $2\theta$ ) dan (b) *area ratio* ( $AR$ ) [1]

Peneliti lain yang telah melakukan pemetaan performa *conical diffuser* pada  $Re$  tertentu ialah Means dkk [9]. Pemetaan performa ini dikaji pada  $Re = 1.61 \times 10^5$  dan  $1.44 \times 10^5$  seperti yang telah ditunjukkan pada gambar 2.8 dan gambar 2.9.  $C_{PR}$  diprediksi menggunakan dua metode yaitu metode *momentum integral* dan hubungan *semiempirical*. Performa optimum dengan  $Re = 1.44 \times 10^5$  terletak pada  $L/D_1 = 14.3$ . Pada gambar 2.8 ditunjukkan garis A-A' dimana pada  $L/D_1 = 14.3$  dengan sudut divergensi  $8.09^\circ$  disarankan menggunakan sudut divergensi yang lebih kecil yaitu  $5.26^\circ$  untuk mendapatkan performa yang optimum. Selain itu, penggunaan geometri *diffuser* yang lebih kecil dengan konfigurasi  $AR = 5.0$  dan  $L/D_1 = 12.2$  akan menghasilkan performa yang sama dengan performa sebelumnya.





**Gambar 2.8** Prediksi peta performa *conical diffuser*, Inlet conditions: Mach number  $M_1$ , 0.2; blockage  $B_1$ , 0.02; Reynolds number  $Re$ ,  $1.61 \times 10^5$  [9]

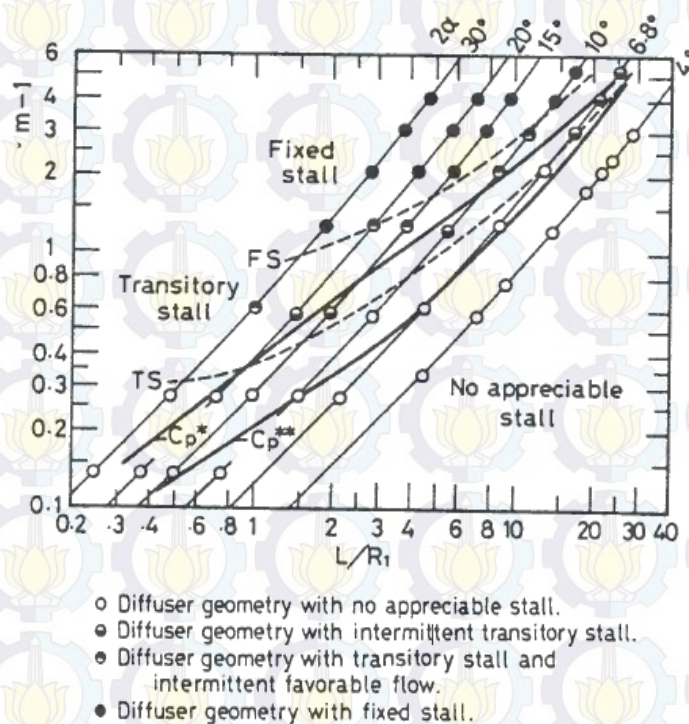


**Gambar 2.9** Prediksi peta performa *conical diffuser*, Inlet conditions: Mach number  $M_1$ , 0.5646; blockage  $B_1$ , 0.0295; Reynolds number  $Re$ ,  $1.44 \times 10^5$ ; cone angle,  $8.09^\circ$  [9]

Layaknya peta kestabilan *flat walled diffuser* yang telah dilakukan McDonald dan Fox [1], Ishikawa dan Nakamura [10] juga telah melakukan pemetaan yang menunjukkan daerah-daerah dengan kondisi *stall* tertentu. *Diffuser* yang diharapkan dalam penelitian ini adalah yang memiliki *length ratio* yang kecil dan sudut divergensi besar. Pada gambar 2.10 ditunjukkan kondisi aliran



dalam geometri *diffuser*,  $m-1$  fungsi  $L/R_1$ . Dimana  $m-1$  adalah *diverging area ratio* ( $A_2/A_1$ ). Garis putus-putus menunjukkan *boundary condition* untuk kondisi *stall*. Garis  $C_p^*$  menunjukkan *area ratio* optimum untuk menghasilkan *pressure recovery* maksimum. Selain itu, garis  $C_p^*$  juga termasuk daerah *transitory stall* bila  $L/R_1$  lebih besar dari 0.9 dan daerah *no appreciable stall* pada  $L/R_1$  lebih kecil dari 0.9. Sedangkan garis  $C_p^{**}$  menunjukkan *length ratio* ( $L/R_1$ ) optimum untuk menghasilkan *pressure recovery* maksimum. Garis  $C_p^{**}$  untuk semua konfigurasi geometri *diffuser* tergolong daerah *no appreciable stall*.



**Gambar 2.10** Hubungan antara garis geometri optimum dan kondisi aliran [10]

Pemetaan performa *conical diffuser* sangat bermanfaat untuk membantu merancang *diffuser* yang baik dan benar berdasarkan pertimbangan ilmiah sehingga meminimalkan efek yang tidak diinginkan dari *adverse pressure gradient* dan separasi aliran.



### 2.3. *Pressure coefficient (Cp), Pressure recovery coefficient (Cp<sub>r</sub>, dan Losses coefficient (k)*

*Pressure coefficient (Cp)* adalah suatu koefisien untuk menyatakan distribusi tekanan pada kontur permukaan suatu benda. *Pressure coefficient* merupakan perbandingan antara selisih tekanan statis lokal pada kontur dengan tekanan statis referensi pada *inlet diffuser* dibandingkan dengan nilai tekanan dinamis *inlet diffuser*.

$$Cp = \frac{p_{s,i} - p_{s,1}}{\frac{1}{2}\rho U^2}, \quad (2.6)$$

dimana:

$p_{s,i}$  : tekanan statis dinding pada  $x/N = i$

$p_{s,1}$  : tekanan statis referensi pada *inlet diffuser*

$\rho$  : massa jenis udara pada  $T = 30^\circ\text{C}$

$U$  : kecepatan pada *inlet test section*

Persamaan 2.6 merupakan perumusan  $Cp_{\text{aktual}}$ . Sedangkan harga  $Cp$  ideal ( $Cp_{\text{inviscid}}$ ) dapat diperoleh dengan mengaplikasikan persamaan *Bernoulli* dimana *section 1* adalah *inlet* dan *section 2* adalah *outlet diffuser*, sehingga persamaan *Bernoulli* dapat diturunkan menjadi:

$$Cp_{\text{inviscid}} = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2, \quad (2.7)$$

Berdasarkan hubungan antara hukum kontinuitas dengan persamaan *area ratio*, maka persamaan 2.7 dapat diubah menjadi persamaan 2.8:

$$Cp_{\text{inviscid}} = 1 - \frac{1}{AR^2}, \quad (2.8)$$

Untuk menyatakan performa *diffuser* dapat ditentukan melalui *pressure recovery coefficient*. *Pressure recovery coefficient* perbandingan antara selisih tekanan statis pada *diffuser outlet* dengan tekanan statis referensi pada *diffuser inlet*



dibandingkan dengan tekanan dinamis yang diukur pada *diffuser inlet* (persamaan 2.9).

$$Cp_r = \frac{p_{s,2} - p_{s,1}}{\frac{1}{2}\rho U^2}, \quad (2.9)$$

dimana:

$p_{s,2}$  : tekanan statis pada *outlet diffuser*.

Harga  $Cp$  maksimum pada *outlet diffuser* menyatakan seberapa besar kemampuan suatu *diffuser* dengan geometri tertentu dan kondisi operasi tertentu untuk meningkatkan tekanan dengan cara memperlambat kecepatan aliran fluida yang mengalir di dalamnya. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin besar  $Cp$  maka semakin baik performa dari *diffuser* tersebut.

*Performa coefficient* adalah suatu bilangan tak berdimensi perbandingan selisih tekanan statis dibanding tekanan dinamisnya. Istilah lain dari *performa coefficient* adalah *pressure recovery coefficient* yang didapatkan dari perumusan 2.9, sedangkan *total pressure loss coefficient* ( $Cp_r$ ) didapatkan dari perumusan 2.10. Nilai  $Cp_r$  dipengaruhi oleh nilai *pressure stagnation inlet diffuser* dan nilai *pressure stagnation outlet diffuser* (persamaan 2.11 dan persamaan 2.12).

$$\zeta = \frac{p_{01} - p_{02}}{\frac{1}{2}\rho U^2}, \quad (2.10)$$

$$p_{01} = p_{s,1} + \frac{1}{2}\rho U_1^2, \quad (2.11)$$

$$p_{02} = p_{s,2} + \frac{1}{2}\rho U_2^2, \quad (2.12)$$

dimana:

$\zeta$  : *Total pressure loss coefficient*

$p_{01}$  : *Pressure stagnation inlet diffuser*

$p_{02}$  : *Pressure stagnation outlet diffuser*

Performa *diffuser* tidak hanya ditinjau oleh besarnya nilai *pressure recovery coefficient* tetapi juga nilai *losses coefficient* ( $k$ ). *Losses coefficient* adalah bilangan tak berdimensi, dimana performa *diffuser* dikatakan baik bila memiliki nilai *losses coefficient* yang rendah. *Losses coefficient* dirumuskan dalam perumusan 2.13.



$$k = \frac{h_m}{\frac{1}{2}U^2} = 1 - \frac{1}{AR^2} - C_p \quad (2.13)$$

dimana:

$k$  : Losses coefficient

$h_m$  : head loss minor ( $m^2/s^2$ )

Menurut **Idelchick** [11], nilai *loss coefficient* yang optimal untuk *conical diffuser* adalah yang memiliki sudut divergensi  $10^\circ \leq (2\theta) \leq 14^\circ$  dengan *area ratio* optimal  $2 \leq AR \leq 10$  (tabel 2.1).

**Tabel 2.1** Karakteristik *conical diffuser* optimum ( $2\theta = 10 - 14^\circ$ )

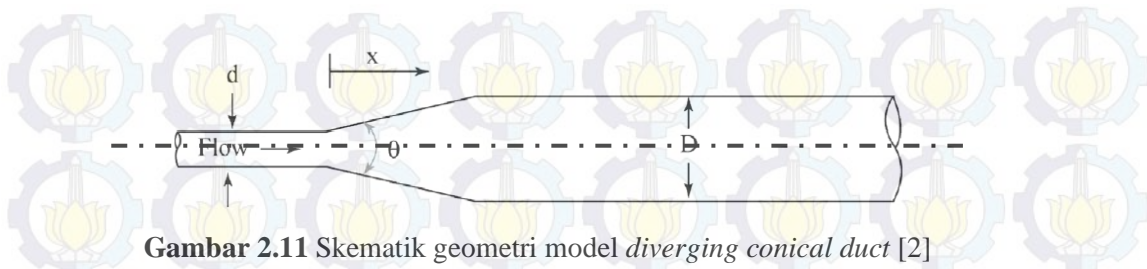
$l_1/D_1$	$C_{p_{maks}}$	$k$	$AR_{opt}$	$L_1/D_{1opt}$
0	0.84 – 0.91	0.13 – 0.08	6 – 10	5.8 – 12.3
2	0.69 – 0.82	0.29 – 0.17	6 – 10	5.8 – 12.3
5	0.64 – 0.77	0.30 – 0.20	4 – 6	4.1 – 8.2
10	0.58 – 0.71	0.17 – 0.27	2 – 6	1.7 – 8.2
20	0.57 – 0.70	0.19 – 0.27	2 – 6	1.7 – 8.2

## 2.4. Analisa aliran di dalam *diffuser*

### 2.4.1 Pengaruh variasi sudut divergensi dalam *diverging conical duct*

**Sparrow dkk** [2] melakukan penelitian terhadap *diverging conical duct* dengan variasi sudut divergensi dan *Reynolds number* diproses secara simulasi numerik menggunakan *software CFX* versi 11.0. Berikut adalah skematik geometri model simulasi yang tercantum dalam gambar 2.11, dimana  $\theta$  adalah sudut divergensi yang divariasikan ( $\theta = 5^\circ, 10^\circ$ , dan  $30^\circ$ ),  $d$  adalah diameter pipa inlet, dan  $D$  adalah diameter pipa exit. Aliran yang memasuki *diffuser* merupakan aliran *fully develop*. *Reynolds number* yang digunakan dalam penelitian ini yaitu dari 500 sampai 33000.





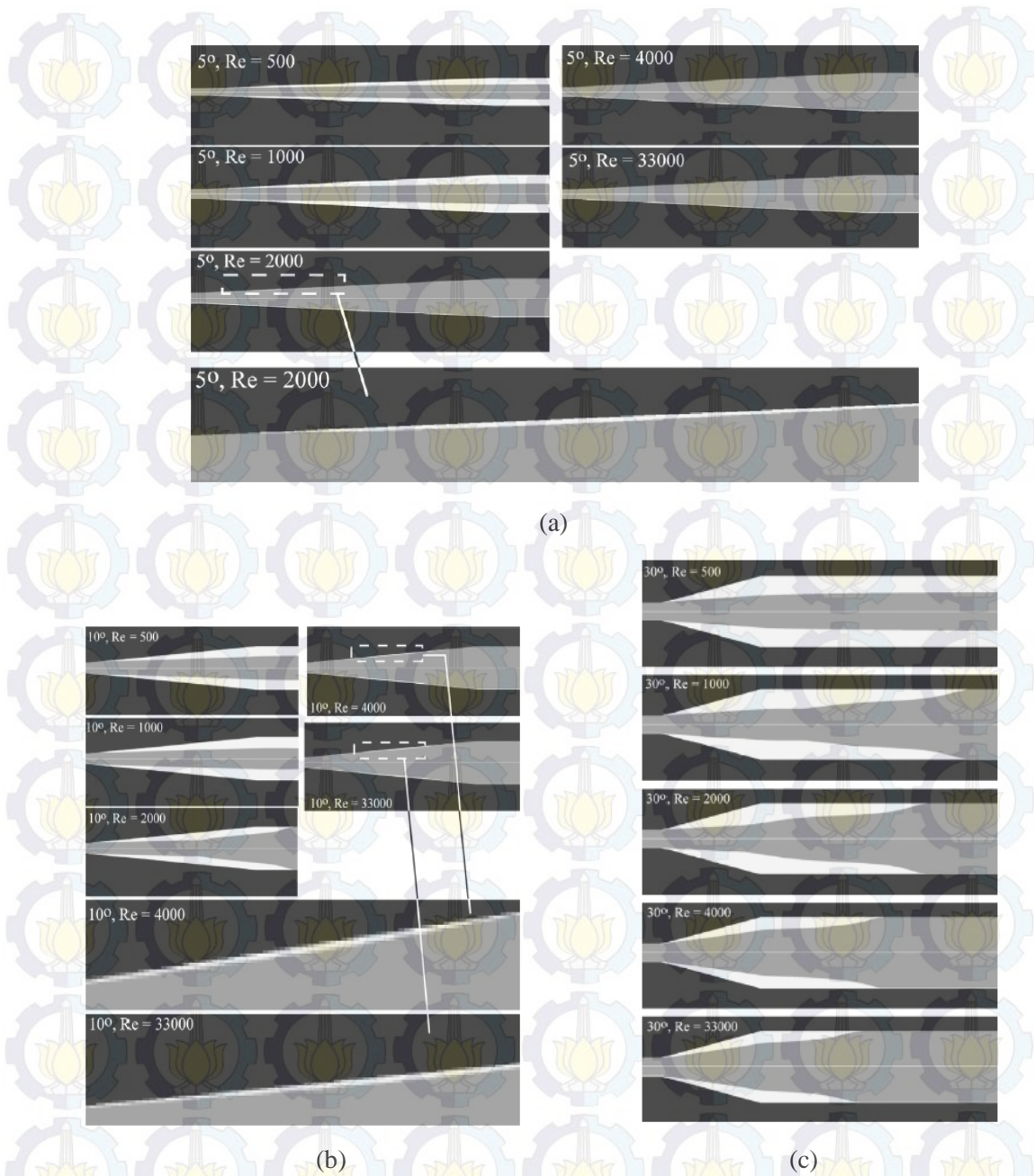
**Gambar 2.11** Skematik geometri model *diverging conical duct* [2]

Penelitian ini disimulasikan menggunakan *steady* RANS dengan model *turbulence* berupa *shear stress transport model* (SST). Model ini dipilih karena kapasitas SST merupakan model yang ahli dalam bidang aliran internal dan terkait dalam rancangan model aliran *regime* transisi.

Pengaturan konvergensi residul pada  $10^{-6}$  untuk semua variabel. *Boundary condition* yang digunakan adalah *no slip* dan semua *solid boundary* bersifat tidak akan mengalami kebocoran.

Pada gambar 2.12 ditunjukkan visualisasi aliran *diverging conical duct* untuk variasi sudut divergensi. Daerah berwarna putih menunjukkan adanya *backflow* yang mengindikasikan separasi sedangkan daerah berwarna abu-abu menunjukkan aliran mengalir searah dengan pembesaran luas penampang *diverging conical duct*. Pada *diverging conical duct* dengan sudut divergensi  $5^\circ$ , separasi aliran terjadi pada  $Re$  rendah ( $Re \leq 2000$ ). Sedangkan untuk sudut divergensi  $10^\circ$  dan  $30^\circ$ , separasi aliran terjadi pada semua variasi  $Re$  ( $Re$  yang menunjukkan aliran laminar maupun turbulen).

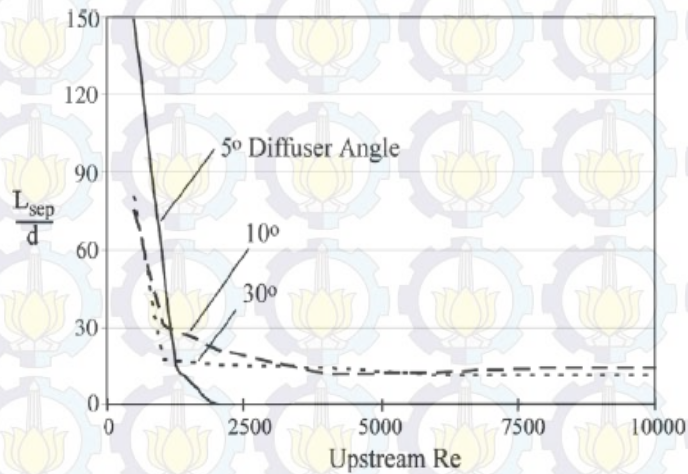




**Gambar 2.12** Visualisasi aliran *diverging conical duct* : pada (a) sudut divergensi 5°, (b) 10°, dan (c) 30° [2]

Pada gambar 2.13 ditunjukkan daerah separasi menurun seiring dengan peningkatan  $Re$ . Rentang  $L_{sep}/d$  dibawah  $Re \leq 2000$  sangat sensitif terhadap  $Re$ . Hasil penelitian ini menunjukkan panjang separasi kearah  $x$  yaitu  $34.2d$ ,  $22.9d$ , dan  $11.5d$  masing-masing pada sudut 5°, 10°, dan 30°.

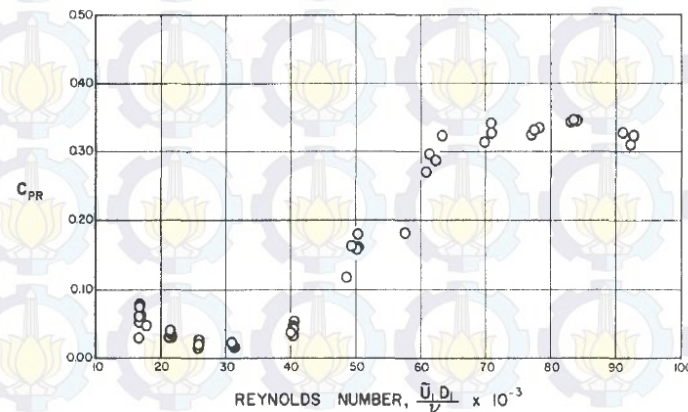




Gambar 2.13 Length separation versus Upstream  $Re$  [2]

#### 2.4.2 Pengaruh *Reynolds number* terhadap performa *conical diffuser*

Pada gambar 2.14 ditunjukkan pengaruh *Reynolds number* pada performa *conical diffuser* dengan sudut divergensi  $(2\theta)$   $31.2^\circ$  [1]. Semakin rendah  $Re$  semakin rendah pula  $C_{pr}$ .  $C_{pr}$  adalah salah satu indikasi performa *diffuser* dimana performa *diffuser* sebanding dengan  $C_{pr}$ . Pada  $Re \geq 75000$ , performa *diffuser* fungsi  $Re$  relatif konstan menunjukkan bahwa performa *diffuser* pada rentang ini tidak dipengaruhi oleh *Reynolds number*.



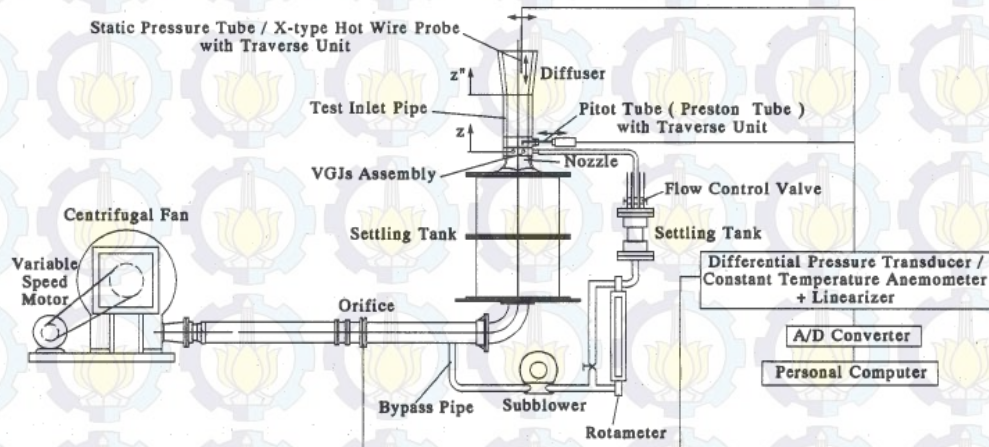
Gambar 2.14 Pengaruh *Reynolds number* pada performa *conical diffuser* ( $2\theta = 31.2^\circ$ ,  $N/R_1 = 4.0$ ) [1]



## 2.5 Pengendalian separasi aliran di dalam *conical diffuser*

### 2.5.1 Pengaruh pengendalian separasi aktif terhadap performa *conical diffuser*

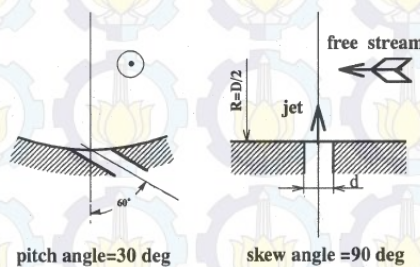
Nishi dkk [4] berupaya untuk mengontrol separasi dengan menggunakan *vortex generator jet* (VGJ) dan skema pengujiannya ditunjukkan pada gambar 2.15. Variasi dalam penelitian ini tercantum dalam tabel 2.2. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh VGJ, ukuran lubang jet, dan jumlah VGJ yang sesuai untuk mendapatkan performa yang maksimal. Pada gambar 2.16 ditunjukkan detail VGJ.



Gambar 2.15 Skema pengujian apparatus (Inlet dia. :  $D = 2R = 125$  mm) [4]

Tabel 2.2 Kondisi Eksperimen [4]

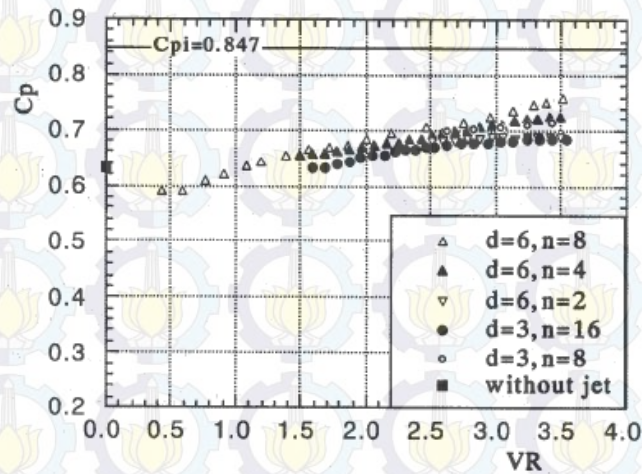
pitch angle	30 deg					
skew angle	90 deg ( co-rotating type )					
hole diameter	6 mm		3 mm			
Diameter ratio, $D/d$	20.8		41.6			
number of jets, $n$	2	4	8	8	16	
$(\pi D / n) / d$	32.7	16.4	8.2	16.4	8.2	
velocity ratio, $V/R$	2.5 ~ 3.5	1.5 ~ 3.5	0.4 ~ 3.5	2.6 ~ 3.4	1.6 ~ 3.6	
$\delta^+ / d$	0.16		0.32			



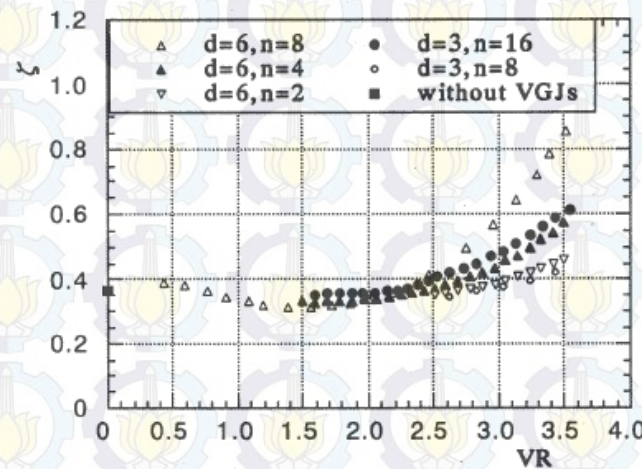
Gambar 2.16 Vortex generator jet hole [4]



Hasil dari penelitian ini diilustrasikan dalam gambar 2.17 (a) dan (b). Trend grafik dari gambar 2.17 (a) naik seiring dengan peningkatan *velocity ratio* ( $VR$ ), *pressure coefficient* ( $C_p$ ), dan ukuran lubang jet terbesar dengan jumlah jet terpasang paling banyak ( $d = 6, n = 8$ ). Pada gambar 2.17 (b) ditunjukkan *losses coefficient* ( $\zeta$ ) maksimum pada  $VR = 3.5$  dan  $d = 6, n = 8$ .



(a)



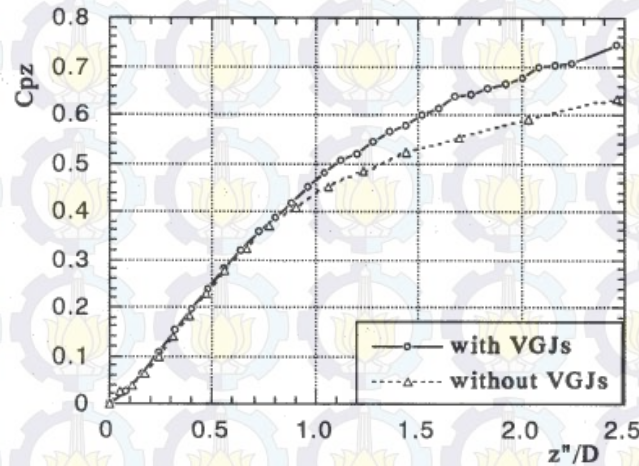
(b)

**Gambar 2.17** Pengaruh  $VR$  : pada (a)  $C_p$  dan (b)  $\zeta$  dalam diffuser  $14^\circ$  dengan VGJ [4]

Pada gambar 2.18 ditunjukkan perbandingan *conical diffuser*  $14^\circ$  tanpa dan dengan VGJ, terlihat bahwa *conical diffuser* dengan penambahan VGJ memiliki *pressure recovery* yang lebih besar dibandingkan tanpa VGJ. Hal ini



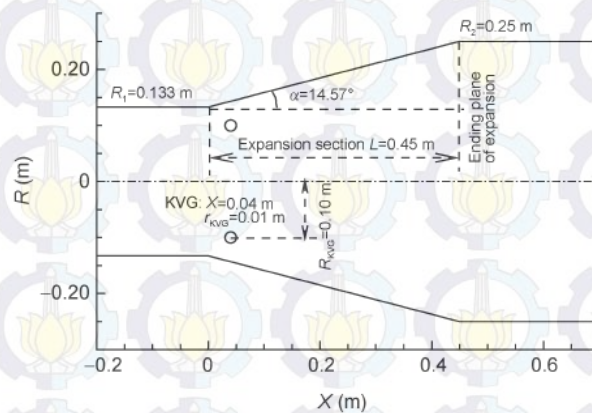
menunjukkan dengan penambahan VGJ, separasi aliran dalam *conical diffuser* akan tertunda.



**Gambar 2.18** Distribusi *pressure recovery* ( $d = 6$ ,  $n = 8$ ,  $VR = 3.5$ ) pada *center axis* [4]

## 2.5.2 Pengaruh pengendalian separasi pasif terhadap performa *conical diffuser*

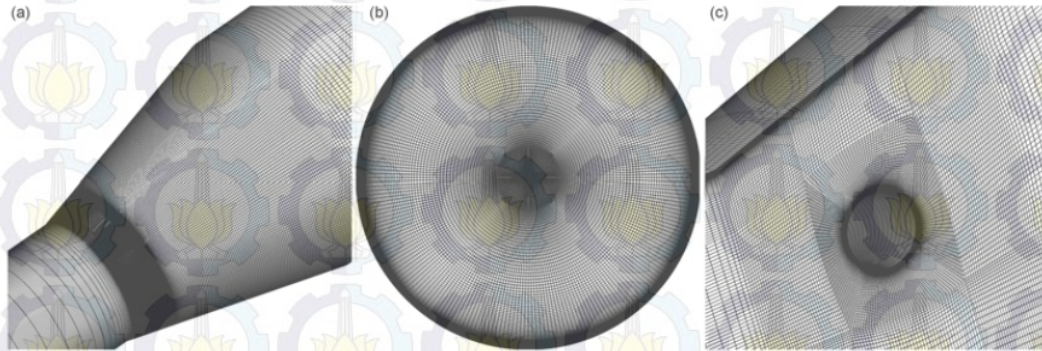
Zhang dkk [6] melakukan penelitian *conical diffuser* tanpa dan dengan penambahan *Karman vortex generator* (KVG) yang disimulasikan dengan 3 variasi metode *unsteady* yaitu URANS, DES, dan DDES. Pada gambar 2.19 ditunjukkan bentuk profil *conical diffuser* dengan penambahan KVG. Dari gambar tersebut terlihat jelas lokasi KVG. Selain variasi metode *unsteady*, Zhang dkk juga memvariasikan 9 posisi peletakan KVG. Hal ini bertujuan untuk dapat mengetahui performa *conical diffuser* maksimum.



**Gambar 2.19** Bentuk profil *conical diffuser* dengan KVG [6]

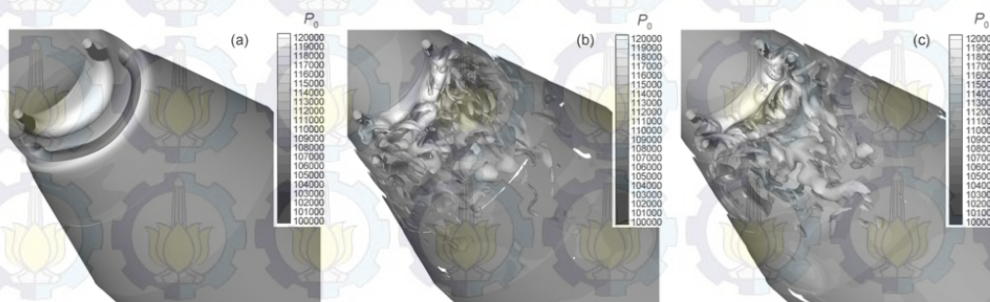


Pada gambar 2.20 ditunjukkan model *meshing* untuk bagian-bagian pada *conical diffuser* yang digunakan oleh **Zhang dkk.** *Grid* dibuat rapat pada ketiga daerah ini agar hasil yang didapat lebih akurat. Kerapatan *grid* juga mempengaruhi waktu iterasi yang dilakukan.



**Gambar 2.20** Computational grid pada *conical diffuser* dengan KVG : (a) grid pada bagian ekspansi, (b) grid pada permukaan *inlet*, (c) grid disekitar KVG [6]

Hasil simulasi dari ketiga variasi metode *unsteady* diilustrasikan dalam gambar 2.21 dan terlihat bahwa URANS (gambar 2.21 (a)) menyajikan struktur turbulen yang terlalu besar sehingga tidak terdeteksi secara detail melalui *vorticity iso surface*. Sedangkan simulasi dengan DES dan DDES menyajikan struktur turbulen yang kecil. Akan tetapi, metode URANS dipilih sebagai metode komputasi *unsteady* yang digunakan untuk mensimulasikan model dengan variasi posisi VG dan dimensinya.



**Gambar 2.21** Perbandingan *vorticity iso surface*: (a) URANS, (b) DES, dan (c) DDES

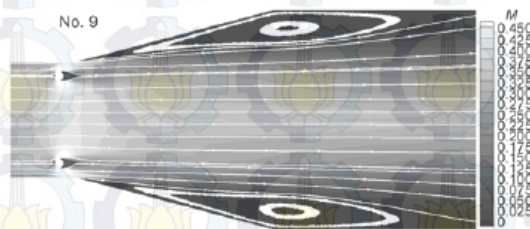
[6]



**Tabel 2.3** Klasifikasi performa dan *total pressure recovery* pada *conical diffuser* dengan variasi KVG [6]

No.	X (m)	R (m)	r (m)	Performance coefficient	Total pressure recovery
Baseline KVG	0.04	0.10	0.01	0.4937	95.23%
KVG No. 1	0.04	0.09	0.01	0.3838	94.49%
KVG No. 2	0.04	0.11	0.01	0.4854	95.15%
KVG No. 3	0.04	0.10	0.0075	0.3524	94.37%
KVG No. 4	0.04	0.11	0.0075	0.3724	94.46%
KVG No. 5	0.04	0.12	0.0075	0.4222	94.88%
KVG No. 6	0.04	0.10	0.005	0.3258	94.38%
KVG No. 7	0.04	0.11	0.005	0.3247	94.32%
KVG No. 8	0.04	0.12	0.005	0.3339	94.39%
KVG No. 9	-0.04	0.10	0.01	0.3578	93.44%
Uncontrolled	—	—	—	0.2465	93.99%

Tabel 2.3 menyajikan hasil simulasi dengan variasi KVG menggunakan metode URANS. Keakuratan dan kehandalan metode URANS sudah diverifikasi oleh banyak metode *advance unsteady turbulence model*. Tipe *conical diffuser* yang memiliki performa paling baik adalah tipe *baseline* KVG. Sedangkan semua konfigurasi dengan jari-jari 0.005 memiliki performa yang buruk. Pada gambar 2.22 ditunjukkan visualisasi aliran dalam *conical diffuser* dengan tipe KVG no. 9 dimana tipe ini tergolong memiliki performa yang buruk. Pada gambar tersebut dapat dilihat besarnya *wake region* yang terbentuk akibat separasi aliran yang terjadi.



**Gambar 2.22** Visualisasi *time averaged flow* pada *symmetry plane* (KVG no. 9)

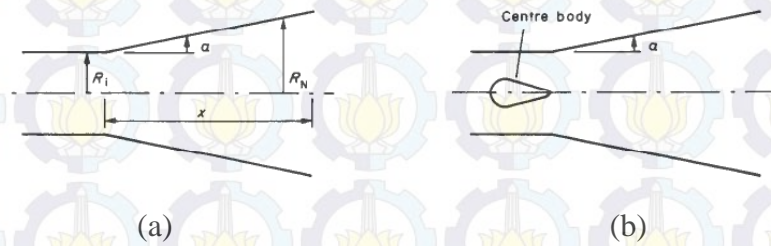
[6]

### 2.5.3 Penelitian secara numerik *conical diffuser* dengan bentuk inlet velocity profil uniform dan wake

**Jeyachandran dan Ganesan** [12] melakukan penelitian secara numerik pada *conical diffuser* dengan *half angle*  $4.5^\circ$  dan  $6^\circ$ . Pada gambar 2.23 ditunjukkan geometri model yang diteliti. Variasi bentuk profil inlet pada *conical*

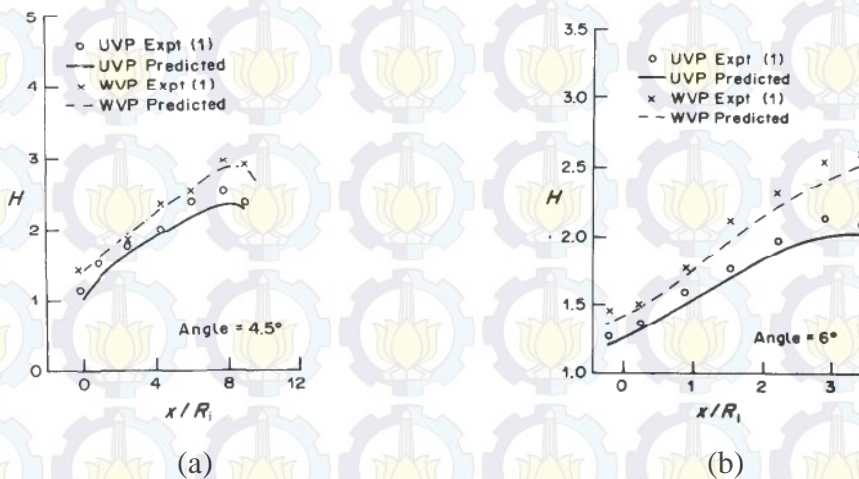


diffuser yaitu *uniform velocity profil* (UVP) dan *wake velocity profil* (WVP). *Prandtl mixing length* digunakan untuk menentukan model turbulensi yang sesuai dengan *conical diffuser*. Dari penelitian ini disajikan karakteristik *boundary layer* masing-masing model dalam *boundary layer* : *displacement thickness*, *momentum thickness*, *shape factor*, dan *blockage factor* yang didapat dari *downstream velocity profil* berbagai posisi.



**Gambar 2.23** Geometri : (a) tanpa *centre body* dan (b) dengan *centre body* [12]

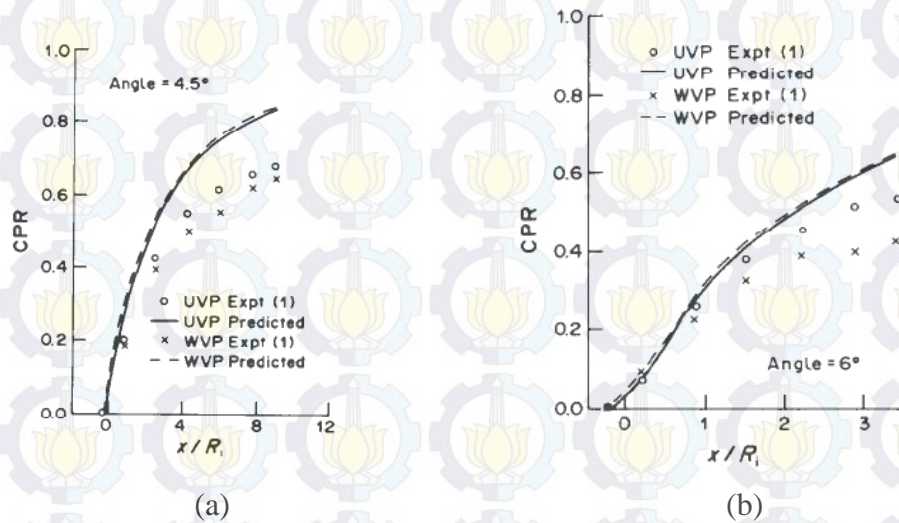
Gambar 2.24 menunjukkan distribusi *shape factor* ( $H$ ) didalam *boundary layer* [12]. Trend grafik *shape factor* semakin meningkat seiring dengan peningkatan  $x/R_i$ . Tipe inlet WVP memiliki nilai *shape factor* yang lebih besar dibandingkan UVP.



**Gambar 2.24** Grafik *shape factor* ( $H$ ) fungsi  $x/R_i$  : (a) *half angle*  $4.5^\circ$  dan (b)  $6^\circ$  [12]

Pada gambar 2.25 ditunjukkan performa diffuser paling baik yaitu *conical diffuser* dengan *half angle*  $4.5^\circ$ . Trend grafik yang terbentuk untuk gambar 2.24 (a) dan (b) serupa yaitu  $C_{PR}$  mengalami peningkatan seiring dengan peningkatan  $x/R_i$ .





**Gambar 2.25** Grafik performa ( $C_{PR}$ ) fungsi  $x/R_1$  : half angle  $4.5^\circ$  (a) dan  $6^\circ$  (b) [12]

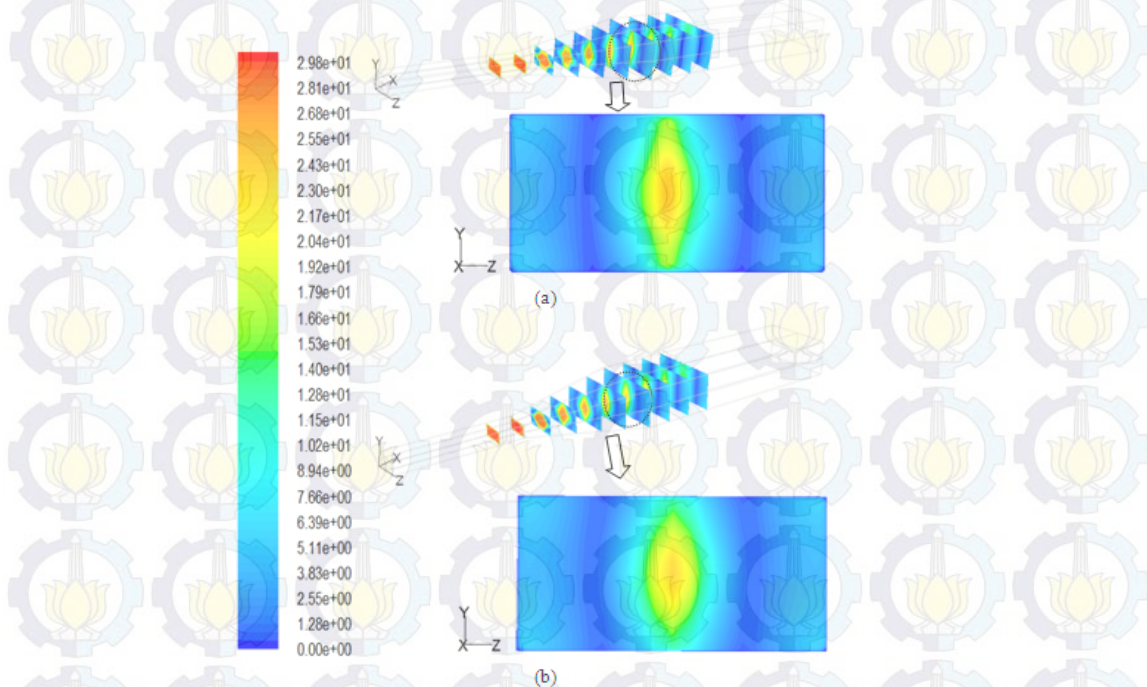
Model sederhana yaitu *uniform velocity profil* dapat diprediksi dengan hipotesa *Prandtl's mixing length*. Sedangkan untuk model yang lebih rumit (model yang mengalami turbulensi) yaitu *wake velocity profil* dapat menggunakan model turbulensi  $k - \epsilon$ .

## 2.6. Fenomena aliran sekunder didalam *diffuser*

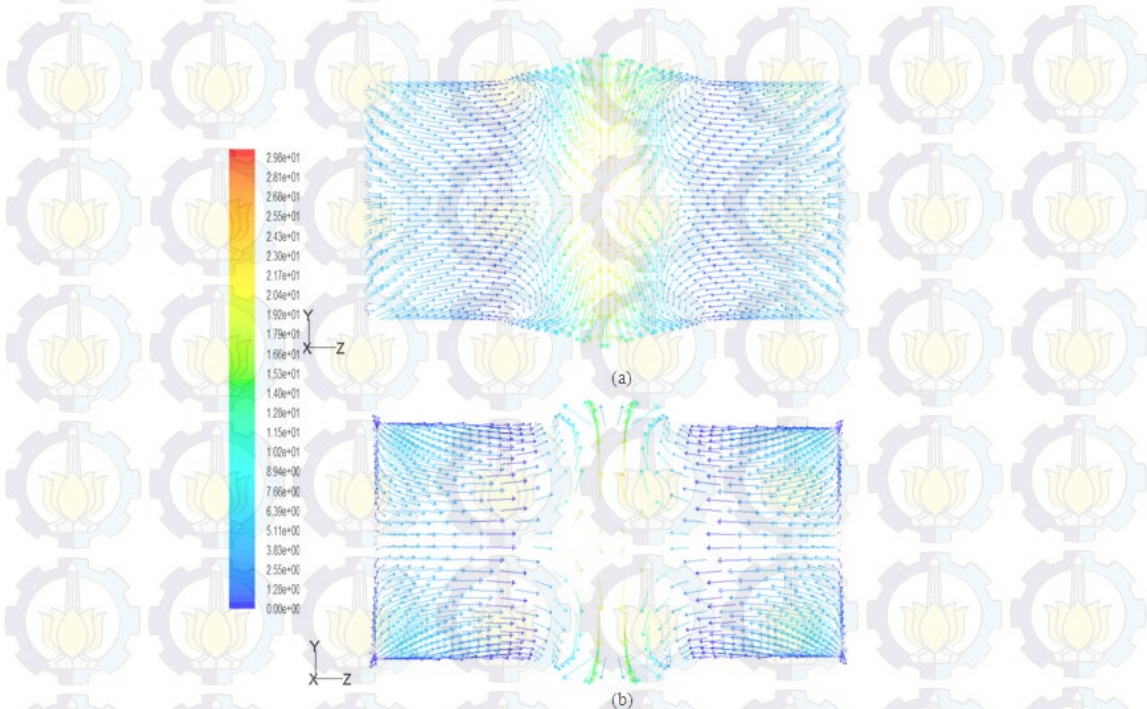
Minimnya penelitian yang membahas aliran sekunder dalam *conical diffuser*, sehingga informasi mengenai aliran sekunder didekati dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh **Khanafi** [13]. Penelitian dilakukan secara numerik pada model *symmetric flat walled diffuser* dengan penambahan *vortex generator* tipe *counter rotating*. Definisi aliran sekunder (*vortex*) merupakan aliran fluida yang terbentuk akibat separasi dan mengalir tidak searah dengan aliran primer. Fenomena terbentuknya aliran sekunder di dalam *symmetric flat walled diffuser* dapat diilustrasikan dengan visualisasi kontur kecepatan (gambar 2.26) dan vektor kecepatan (gambar 2.27) pada bidang melintang terhadap aliran (bidang  $y-z$ ). Pemilihan bidang melintang yang ditampilkan untuk visualisasi aliran sekunder agar lebih mudah diamati adalah *cross section* yang telah terjadi *backflow* ( $x/L_1 = 2$  adalah *cross section* pada *outlet diffuser*). Berdasarkan fenomena yang ditunjukkan gambar 4.27 dapat dijelaskan bahwa aliran sekunder memiliki sifat bergerak sirkulasi pada arah yang berlainan dengan arah aliran utama. Aliran



sekunder pada *diffuser* tanpa *vortex generator* terlihat lebih teratur dibandingkan dengan aliran sekunder pada *diffuser* dengan *vortex generator*



**Gambar 2.26** Kontur kecepatan bidang  $x/L_1 = 2$  di dalam *symmetric flat-walled diffuser* ( $2\theta_1 = 12^\circ$ ) untuk (a) dengan VG dan (b) tanpa VG (*velocity magnitude* dalam *m/s*) [13]



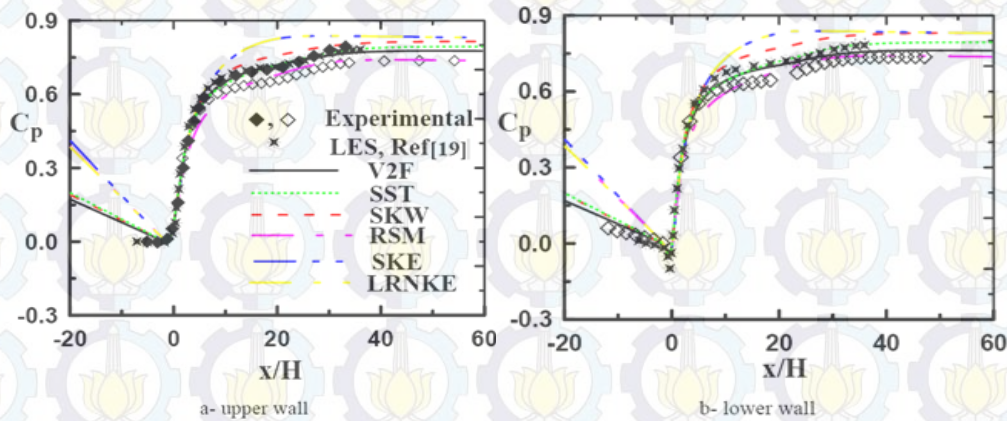
**Gambar 2.27** Vektor kecepatan bidang melintang  $x/L_1 = 2$  pada *diffuser* ( $2\theta_1 = 12^\circ$ ) untuk (a) dengan VG dan (b) tanpa VG (*velocity magnitude* dalam *m/s*) [13]



## 2.7. Karakteristik *pressure coefficient* ( $C_p$ ) dan *skin friction coefficient* ( $C_f$ ) didalam *diffuser*

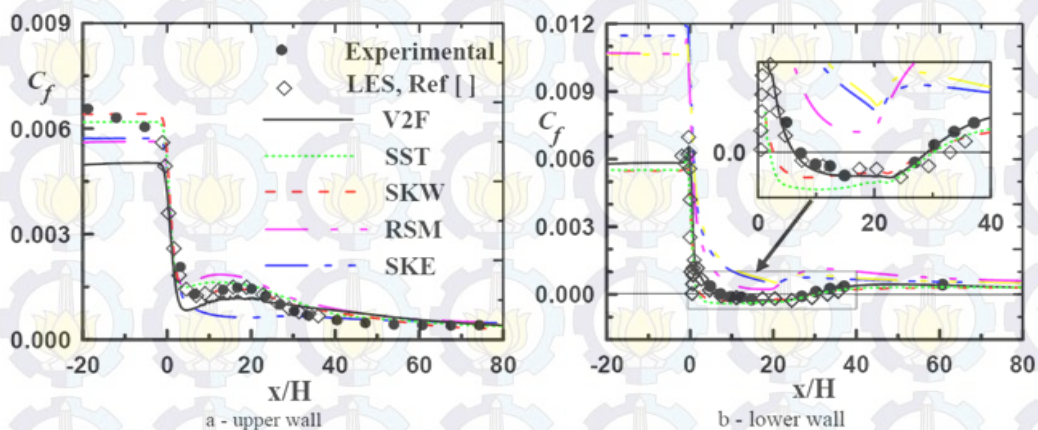
Penelitian pada *conical diffuser* yang membahas mengenai *skin friction coefficient* dapat didekati dengan informasi dari penelitian yang dilakukan oleh **El-Behery dan Hamed** [14]. Penelitian dilakukan secara numerik dengan menggunakan *software* Fluent 6.3.26 dan menggunakan 6 buah variasi *turbulence model* digunakan pada penelitian ini, meliputi *standard k- $\epsilon$  model*, *low Reynolds number k- $\epsilon$  model*, *standard k- $\omega$  model*, *shear stress transport k- $\omega$  (SST)*, *Reynolds stress model (RSM)* dan  *$v^2$ -f turbulence model*. Bilangan *Reynolds* yang digunakan berdasarkan tinggi inlet *diffuser* dan *bulk velocity* pada inlet *diffuser* adalah  $1,8 \times 10^4$ .

Hasil penelitian berupa distribusi *pressure coefficient* pada *upper wall* dan *lower wall* ditunjukkan pada gambar 2.28 dan *skin friction coefficient* pada *upper wall* dan *lower wall* ditunjukkan pada gambar 2.29. El-Behery dan Hamed membandingkan hasil penelitian mereka dengan dengan hasil penelitian Obi et al, Kaltenbach, dan Buice-Eaton.



**Gambar 2.28** Perbandingan distribusi *wall pressure coefficient* antara hasil penelitian el-behery dkk dengan eksperimen Obi et al (*closed symbols*), eksperimen Buice dan Eaton (*open symbols*) serta simulasi LES Kaltenbach [14]





**Gambar 2.29** Perbandingan *skin friction coefficient* antara hasil penelitian el behery dkk dengan penelitian eksperimen Obi et al (*closed symbols*), eksperimen Buice dan Eaton (*open symbols*) serta simulasi LES Kaltenbach [14]

Perbedaan penelitian sekarang dengan penelitian - penelitian terdahulu terangkum dalam tabel 2.4.

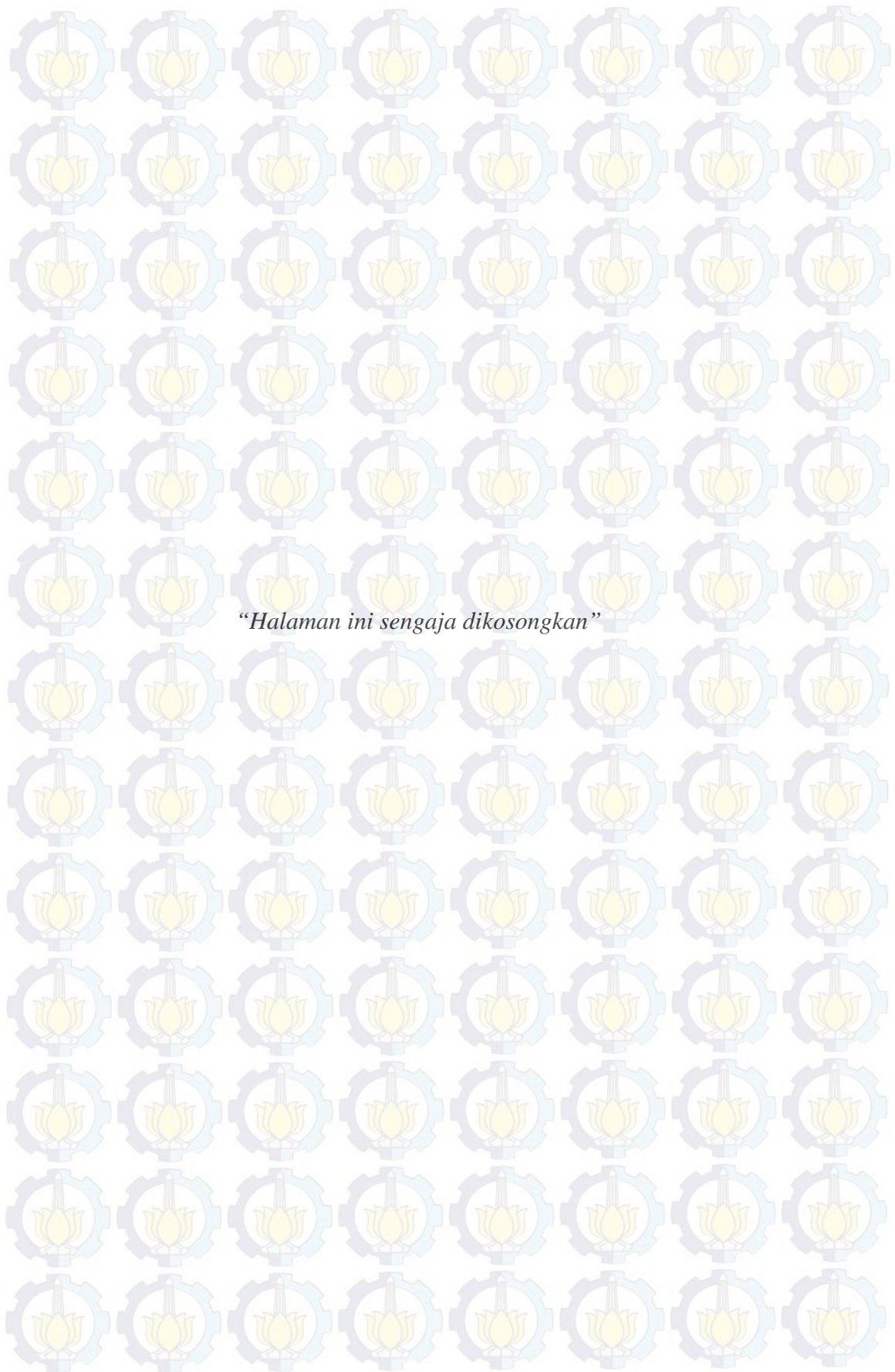
**Tabel 2.4** Data perbandingan antara penelitian terdahulu dengan penelitian yang akan dilakukan sekarang

No	Penelitian Terdahulu		Penelitian Sekarang
1.	McDonald dan Fox [1]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eksperimen</li> <li>Fluida kerja berupa air</li> <li>Sudut divergensi (<math>2\theta</math>) = <math>2^\circ</math>, <math>4^\circ</math>, <math>8^\circ</math>, <math>15.8^\circ</math>, <math>31.2^\circ</math></li> <li>Area ratio (AR) tidak konstan</li> <li><math>Re_{DI} = 1.25 \times 10^5</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Numerik 3D (dengan <i>Software</i> Fluent)</li> <li>Fluida kerja berupa udara pada <math>T = 30^\circ\text{C}</math></li> <li>Sudut divergensi (<math>2\theta</math>) = <math>30^\circ</math></li> <li>Area ratio tidak konstan, (AR) = 2, 6, dan 8</li> <li><math>Re_{DI} = 1.89 \times 10^4</math> dan <math>Re_{DI} = 4.50 \times 10^4</math></li> <li>Tanpa dan dengan bodi pengganggu berupa <i>circular ring</i></li> </ul>
2.	Means dkk [9]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eksperimen dan Numerik (analitik)</li> <li>Fluida kerja berupa udara</li> <li>Sudut divergensi (<math>2\theta</math>) = <math>8.09^\circ</math> untuk eksperimen dan <math>4^\circ &lt; 2\theta &lt; 12^\circ</math> untuk analitik</li> <li>Area ratio (AR) = 9.143 untuk eksperimen dan untuk analitik 3.0 dan 3.3</li> <li><math>Re_{DI} = 1.44 \times 10^5</math></li> </ul>	
3.	Jeyachandran dan Ganesan [12]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Numerik (analitik)</li> <li>Half angle, (<math>\theta</math>) = <math>4.5^\circ</math> dan <math>6^\circ</math></li> <li>Tanpa dan dengan bodi pengganggu pada <i>inlet</i> berupa <i>bluff body</i></li> </ul>	



4.	Ishikawa dan Nakamura [10]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eksperimen</li> <li>Fluida kerja berupa udara (<i>uniform flow</i> dan <i>free discharge</i> pada inlet)</li> <li><math>4^{\circ} \leq 2\theta \leq 30^{\circ}</math></li> <li><math>1.13 \leq AR \leq 6.22</math></li> <li><math>Re_{DI} = 0.96 \times 10^5</math></li> <li><math>I_1 = 0.5 \%</math> (Intensitas turbulensi)</li> </ul>	
5.	Sparrow dkk [2]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Numerik 2D</li> <li>Software CFX 11.0</li> <li><i>Steady flow</i></li> <li><math>2\theta = 5^{\circ}, 10^{\circ}, 30^{\circ}</math></li> <li><i>Turbulence model = SST model</i></li> <li><math>Re_{DI} = 500, 1000, 2000, 4000, \text{ dan } 33000</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Numerik 3D</li> <li>Fluida kerja berupa udara pada <math>T = 30^{\circ}\text{C}</math> (<math>T^{\circ}\text{C} =</math></li> <li>Software Fluent 6.3.26</li> <li><i>Steady flow</i></li> <li>Sudut divergensi (<math>2\theta</math>) = <math>30^{\circ}</math></li> <li><i>Turbulence model = standard k-<math>\epsilon</math> model</i></li> <li>Area ratio tidak konstan, (AR)= 2, 6, dan 8</li> <li><math>Re_{DI} = 1.89 \times 10^4</math> dan <math>Re_{DI} = 4.50 \times 10^4</math></li> </ul>
6.	Lee dkk [3]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Numerik 3D</li> <li>Metode DNS</li> <li><math>2\theta = 2^{\circ}, 4^{\circ}</math> dan <math>8^{\circ}</math></li> <li><math>Re_{DI} = 15000</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><i>Vortex generator</i> berupa <i>circular ring</i></li> <li><i>Discretization method = second order up-wind</i></li> </ul>
7.	Zhang dkk [6]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Numerik 3D</li> <li><i>Unsteady flow</i> (URANS, DES, dan DDES)</li> <li><math>2\theta = 29.14^{\circ}</math></li> <li><math>AR = 3.533</math></li> <li><i>Vortex generator</i> berupa <i>circular ring</i></li> <li><i>Turbulence model = SST model</i></li> <li><i>Discretization method = 3MUSCL up-wind</i></li> </ul>	







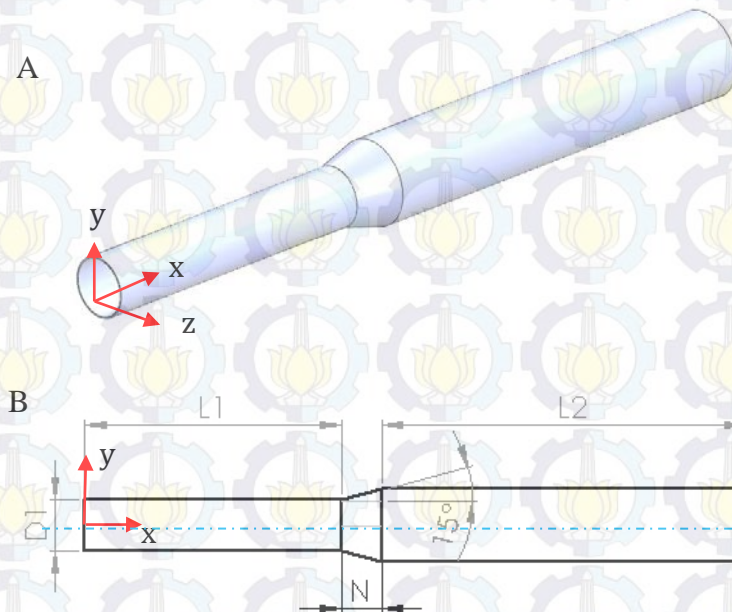
### BAB III

## METODE PENELITIAN

Pada bab ini membahas metode yang akan digunakan pada penelitian ini, yaitu metode penelitian numerik. Metode penelitian numerik menggunakan *software Fluent 6.3.26* untuk menganalisa karakteristik aliran didalam *conical diffuser 3D* dengan sudut divergensi konstan, *area ratio* ( $AR$ ) = 2, 6, dan 8 serta penambahan *vortex generator*. Penelitian ini akan menggunakan bilangan *Reynolds* berdasarkan pada diameter inlet *diffuser* ( $D_1$ ) yaitu  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$  yang berkaitan dengan kecepatan aliran fluida sebesar 7.5 m/s dan 18 m/s dengan rapat massa fluida ( $\rho$ ) = 1,17 kg/m<sup>3</sup> dan viskositas ( $\mu$ ) =  $1,86 \times 10^{-5}$  kg/m.s.

#### 3.1 Geometri *diffuser*

Geometri *diffuser* pada penelitian ini berupa *conical diffuser* dengan variasi *area ratio* yaitu perbandingan luasan penampang outlet dengan luasan penampang inlet ( $A_2/A_1$ ) = 2, 6, dan 8 dengan konfigurasi *vortex generator* *circular ring*. Geometri *diffuser* tersebut ditunjukkan seperti gambar 3.1, sedangkan geometri *vortex generator* ditunjukkan seperti gambar 3.2.



**Gambar 3.1** Geometri *conical diffuser* tanpa penambahan *vortex generator*, (a) tampak luar, (b) tampak samping



Spesifikasi dimensi *diffuser* pada gambar 3.1 pada penelitian ini dapat diuraikan sebagai berikut.

*Conical diffuser* ( $AR$ ) = 2

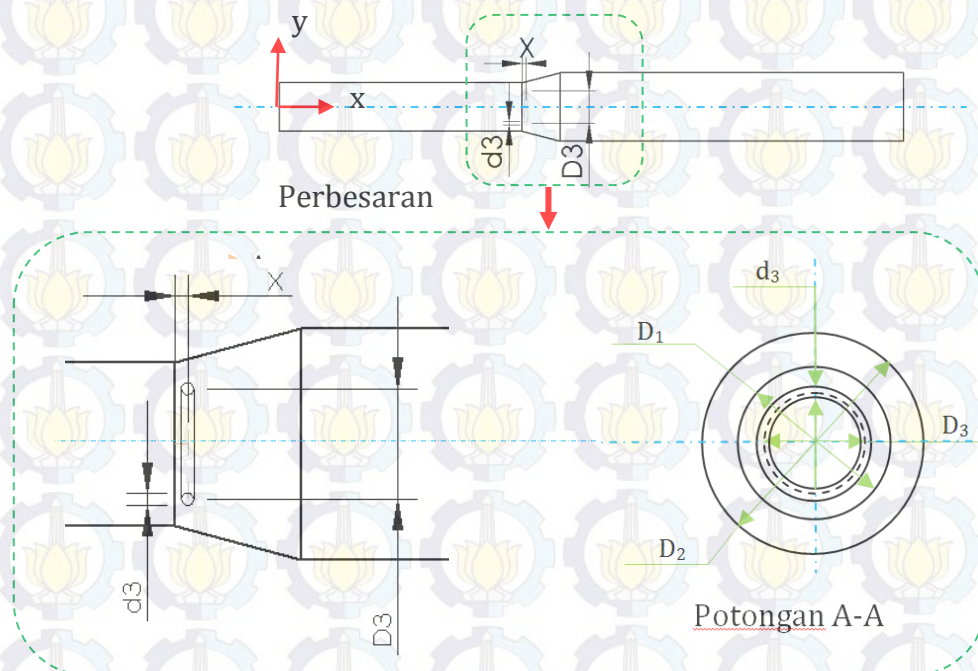
- Panjang *diffuser* ( $N$ ) : 31 mm
- Panjang *upstream channel* ( $L_1$ ) : 200 mm
- Panjang *downstream channel* ( $L_2$ ) : 452.8 mm
- Diameter inlet *diffuser* ( $D_1$ ) : 40 mm
- Diameter outlet *diffuser* ( $D_2$ ) : 56.6 mm
- sudut divergensi ( $2\theta$ ) :  $30^\circ$

*Conical diffuser* ( $AR$ ) = 6

- Panjang *diffuser* ( $N$ ) : 108.9 mm
- Panjang *downstream channel* ( $L_2$ ) : 784 mm
- Diameter outlet *diffuser* ( $D_2$ ) : 98 mm

*Conical diffuser* ( $AR$ ) = 8

- Panjang *diffuser* ( $N$ ) : 136.5 mm
- Panjang *downstream channel* ( $L_2$ ) : 905.6 mm
- Diameter outlet *diffuser* ( $D_2$ ) : 113.2 mm



**Gambar 3.2** Geometri vortex generator (circular ring)



Konfigurasi dari pemasangan *vortex generator* pada penelitian ini sesuai dengan penelitian **Zhang dkk** [7], yang dapat diuraikan sebagai berikut.

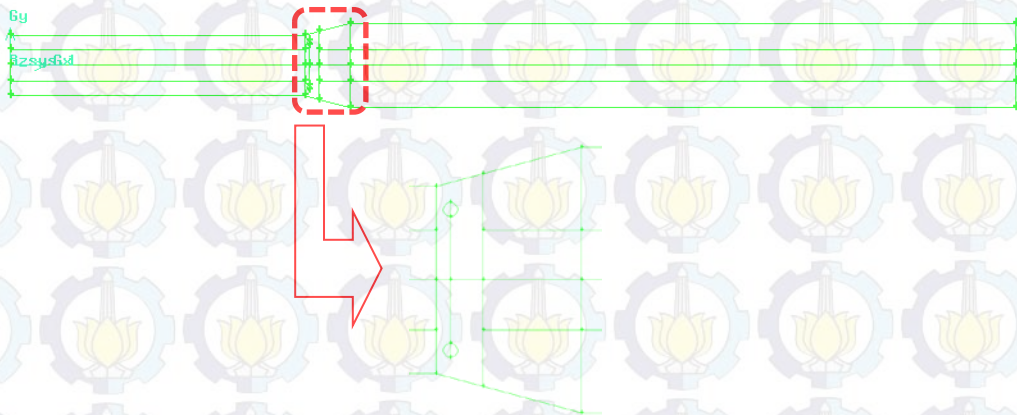
- Terletak di  $x/N = 0.1$  (setelah inlet *diffuser*)
- Diameter *centerline* lingkaran VG ( $D_3/D_1$ ) : 0.75
- Diameter kawat VG ( $d_3/D_3$ ) : 0.1
- Bentuk *vortex generator* yaitu *circular ring vortex generator*

### 3.2 Metode Numerik

Penelitian numerik ini merupakan pemodelan 3D (dimensi) *steady* menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan *software Fluent* 6.3.26. dan *software GAMBIT* 2.4.6 untuk membuat model awal dan melakukan diskritisasi (*meshing*) pada model tersebut. Prosedur yang dilakukan pada penelitian numerik adalah sebagai berikut:

#### 3.1.1. Tahap *pre-processing* menggunakan *software GAMBIT* 2.4.6

- a) Pembuatan model dan geometri berupa *conical diffuser* (gambar 3.3) yang dimodifikasi dengan *vortex generator* dalam bentuk 3D



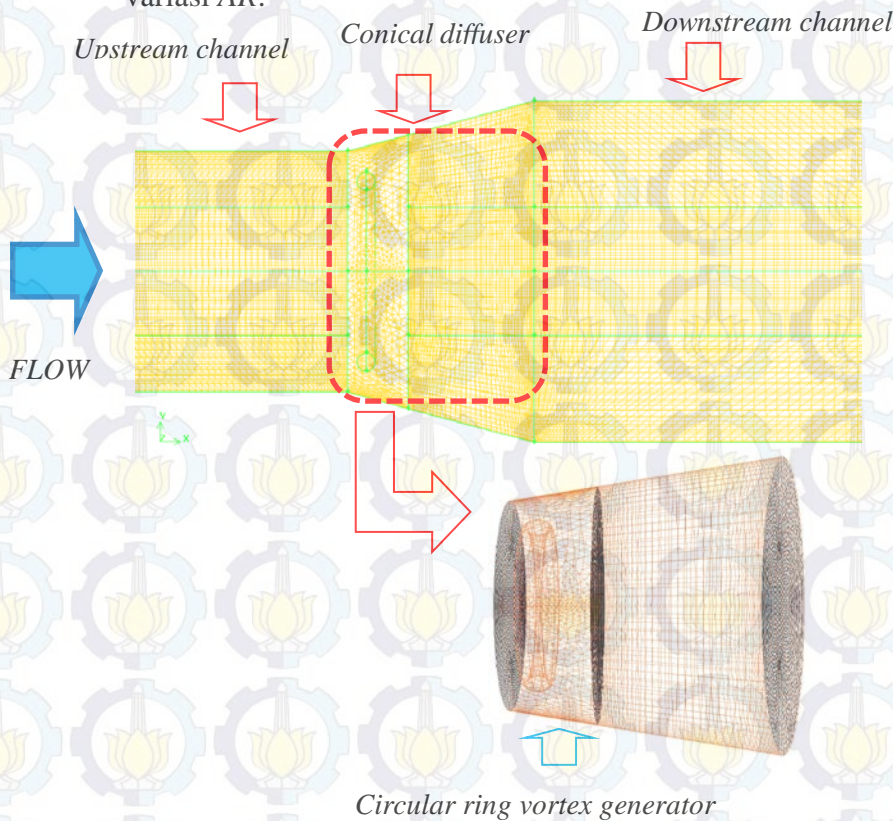
**Gambar 3.3** Model 3D *conical diffuser* dengan *vortex generator* pada GAMBIT

- b) Pembuatan *meshing* volume dengan tipe *hexahedral-map* untuk model *baseline* dan *T-grid* untuk model *modified* pada daerah sekitar *vortex generator*. Sesuai dengan penelitian Zhang dkk [7], *meshing* yang digunakan adalah dengan *grading* pada arah vertikal dengan distribusi *mesh* yang semakin rapat pada semua dinding, baik *diverging wall*



maupun *straight wall*, serta pada bagian *vortex generator*. Hal ini dilakukan sebagai efek adanya *wall function*. Hasil *meshing* ditunjukkan pada gambar 3.4.

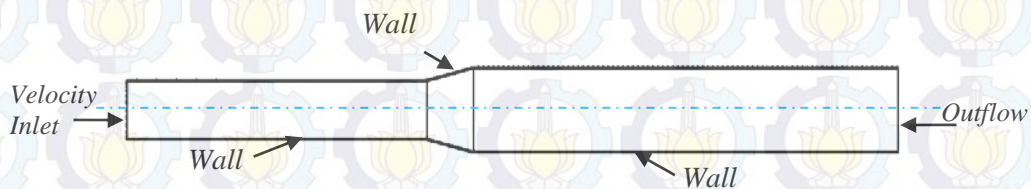
- Untuk daerah *velocity inlet* dan *outflow* (sisi vertikal), digunakan tipe *grading successive ratio single sided* dengan *ratio* 1 sebesar 0.95 kearah dinding *channel*. Sedangkan untuk *spacing interval count* berbeda-beda menyesuaikan dengan variasi *AR*.
- Untuk daerah *wall* pada *upstream channel*, *diffuser* dan *down stream channel* digunakan tipe *grading successive ratio single sided* dengan *ratio* 1 sebesar 1. Bagian rapat dekat *inlet* dan *outlet diffuser* diatur dengan *mesh boundary layer* dengan mengatur *first row* (a) sebesar 0.2 dan *growth factor* sebesar 1.1 dengan jumlah baris berbeda-beda menyesuaikan dengan variasi *AR*. Sedangkan untuk *spacing interval count* berbeda-beda menyesuaikan dengan variasi *AR*.



**Gambar 3.4** Meshing pada conical diffuser dengan vortex generator ( $2\theta = 30^\circ$ ) 3D pada GAMBIT



- c) Mendefinisikan kondisi batas yaitu penentuan parameter-parameter dan batasan yang mungkin terjadi pada aliran. Kondisi batas *inlet* adalah *velocity inlet*. Kondisi batas *outlet* adalah *outflow* (gambar 3.5).



**Gambar 3.5** Boundary condition pada model conical diffuser

### 3.2.2 Tahap processing menggunakan software Fluent 6.3.26

a) *Grid*

Langkah awal setelah masuk pada *software* Fluent dilakukan *read* untuk data hasil *eksport* GAMBIT. Kemudian dilakukan pengecekan *grid*. Setelah itu ditentukan skala. Pada penelitian ini menggunakan skala dalam *mm*.

b) *Models*

Pada langkah ini dilakukan pemodelan karakteristik aliran, meliputi pemilihan model *solver* dan penentuan *turbulence model* yang digunakan. Solver yang digunakan *steady 3D*. *Turbulence model* yang digunakan untuk *conical diffuser* ini adalah *standard k-ε model* [12].

c) *Materials*

Merupakan penetapan jenis material yang akan digunakan yaitu udara dengan *density* ( $\rho$ ) = 1,17 kg/m<sup>3</sup> dan *viskositas* ( $\mu$ ) = 1,86 x 10<sup>-5</sup> N.s/m<sup>2</sup>.

d) *Operating Conditions*

Menentukan kondisi daerah operasi dan lingkungan di sekitar model. *Operating conditions* menggunakan *operating pressure* sebesar 101325 pascal.



e) *Boundary Conditions* (kondisi batas)

Daerah *inlet* merupakan *upstream channel inlet* dan *outlet* adalah *downstream channel outlet* (gambar 3.5). Pada daerah *inlet* diasumsikan sebagai *velocity inlet* dengan nilai kecepatan ditentukan dari penelitian **McDonald dan Fox** [1], untuk kondisi bilangan *Reynolds* pada sisi *diffuser inlet*,  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$  sebesar 7.5 m/s dan  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$  sebesar 18 m/s. Data lain yang di-input-kan selain kecepatan inlet adalah intensitas turbulensi berbasis  $Re_{DI}$  yang didapatkan dari perumusan dari *Fluent 6.3 User guide* yaitu masing-masing sebesar 4.7% dan 4.2% dan *length scale* sebesar 2.8 mm. Sedangkan *outlet* adalah *outflow*, *wall* merupakan batasan semua dinding *channel* dan *diffuser*, dan tengah merupakan *interior*. *Boundary conditions* untuk model dengan *vortex generator*, *vortex generator* didefinisikan *wall*.

f) *Solution*

*Solution* pada penelitian ini akan menggunakan *discretization second order* untuk *pressure*, *second-order upwind* untuk *momentum*, *turbulence kinetic energy* dan *turbulence dissipation rate*.

g) *Initialize*

Merupakan langkah perhitungan awal untuk memudahkan dalam mendapatkan hasil yang konvergen pada tahap iterasi. *Initialize* dihitung dari *inlet*.

h) *Monitor Residual*

Merupakan tahapan untuk penyelesaian masalah, berupa proses iterasi sampai mencapai harga kriteria konvergensi yang diinginkan. Kriteria konvergensi ditetapkan bila residual error sudah mencapai  $10^{-4}$ , artinya proses iterasi dinyatakan telah konvergen setelah residualnya mencapai harga kurang dari  $10^{-4}$ . *Residual error* sebesar  $10^{-4}$  ditetapkan untuk kecepatan ke arah *x*, *y*, dan *z*.



i) *Iterate*

Merupakan langkah kelanjutan dari *monitor residual* yang merupakan langkah perhitungan pada Fluent 6.3.26. Pada tahap ini dilakukan iterasi sampai harga *residual error* sebesar  $10^{-4}$ .

j) *Grid independency*

Merupakan metode untuk mendapatkan keakuratan data pada langkah *post processing*. Hal ini agar data yang diperoleh dapat digunakan untuk menentukan tingkat serta struktur *grid* terbaik agar hasil pemodelan mendekati sebenarnya, namun daya komputasi yang diperlukan tidak besar.

Tabel 3.1 menunjukkan macam-macam *meshing* pada *conical diffuser* 3D tanpa *vortex generator* dengan *area ratio* 6 serta bilangan *Reynolds*  $1.26 \times 10^4$  dengan kecepatan inlet,  $U = 5$  m/s. *Meshing* 1 merupakan *meshing* yang paling renggang dengan jumlah *cells* 801000, sedangkan *meshing* 5 adalah *meshing* yang paling rapat dengan jumlah *cells* 1800000. Analisa *grid independency* ditinjau dari perubahan nilai  $p_{02}$  (*total pressure* pada  $x/N = 1$ ).

**Tabel 3.1** Analisa *grid independency total pressure* pada posisi ( $x/N = 1$ ).

Model <i>Mesh</i>	Jumlah <i>Grid</i>	$p_{02}$ (Pa)	Perubahan (%)
		Nilai	
1	801000	1.116	-
2	971520	1.201	7.077
3	1225000	1.348	10.905
4	1706250	1.791	24.735
5	1800000	1.793	0.112

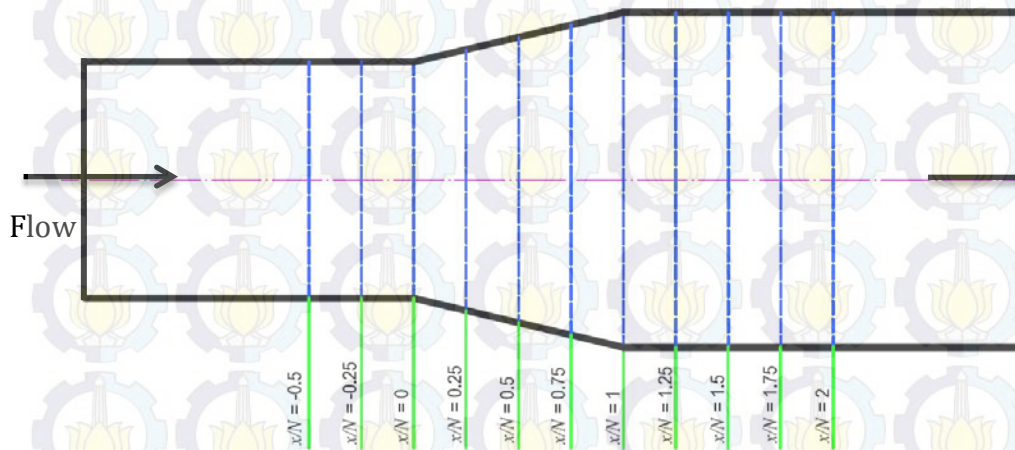
Pada tabel 3.1 dapat dilihat bahwa *mesh* 1 mengalami perubahan terbesar yaitu 1.13, sedangkan *mesh* 5 mengalami perubahan terkecil yaitu 0.112%. *Mesh* 4 memiliki nilai tekanan stagnasi yang hampir sama dengan *mesh* 5, namun *mesh* 4 mempunyai jumlah *cells* yang lebih sedikit daripada *mesh*



5. Oleh karena itu *mesh* 4 dipilih sebagai *meshing* yang terbaik, karena mengalami perubahan yang kecil dan jumlah *cells* yang lebih sedikit sehingga daya komputasi yang digunakan lebih efisien.

k) *Post Processing*

Merupakan penampilan hasil yang telah diperoleh. Dapat divisualisasikan melalui tampilan *grid display*, plot kontur (tekanan, kecepatan, dsb), plot *vector* dan lain-lain sesuai dengan yang ingin digunakan pada analisa. Posisi pengambilan data profil kecepatan dan intensitas turbulensi pada model ditunjukkan pada gambar 3.6.



**Gambar 3.6** Posisi pengambilan data untuk profil kecepatan dan intensitas turbulensi



## BAB IV

### ANALISA DAN PEMBAHASAN

Bab ini akan menjelaskan mengenai analisa dan pembahasan hasil simulasi numerik *model conical diffuser 3D* dengan sudut divergensi  $(2\theta) = 30^\circ$  tanpa dan dengan penambahan *vortex generator* yang berupa *circular ring*. Bilangan *Reynolds* yang digunakan dalam penelitian ini berdasarkan pada diameter inlet *diffuser* ( $D_I$ ) dan kecepatan inlet *diffuser* sebesar  $Re_{D_I} = 1.89 \times 10^4$  dan  $Re_{D_I} = 4.50 \times 10^4$ . Perbedaan karakteristik *boundary layer* pada penelitian ini tidak hanya ditinjau dari bilangan *Reynolds* tetapi juga berdasarkan variasi *area ratio* ( $AR$ ). Data yang diperoleh dari hasil simulasi berupa data kuantitatif dan kualitatif. Data kuantitatif dipresentasikan dalam bentuk grafik, yaitu profil kecepatan, profil intensitas turbulensi, distribusi *pressure coefficient* ( $C_p$ ), distribusi *skin friction coefficient* ( $C_f$ ), *loss coefficient* ( $k$ ), dan *total pressure loss coefficient* ( $\zeta$ ). Sedangkan data kualitatif dipresentasikan dalam bentuk visualisasi aliran, yaitu kontur kecepatan, vektor kecepatan, dan kontur tekanan statis. Berdasarkan penelitian terdahulu, penelitian numerik ini menggunakan *turbulence model k- $\epsilon$  standard*.

#### 4.1 Profil Kecepatan

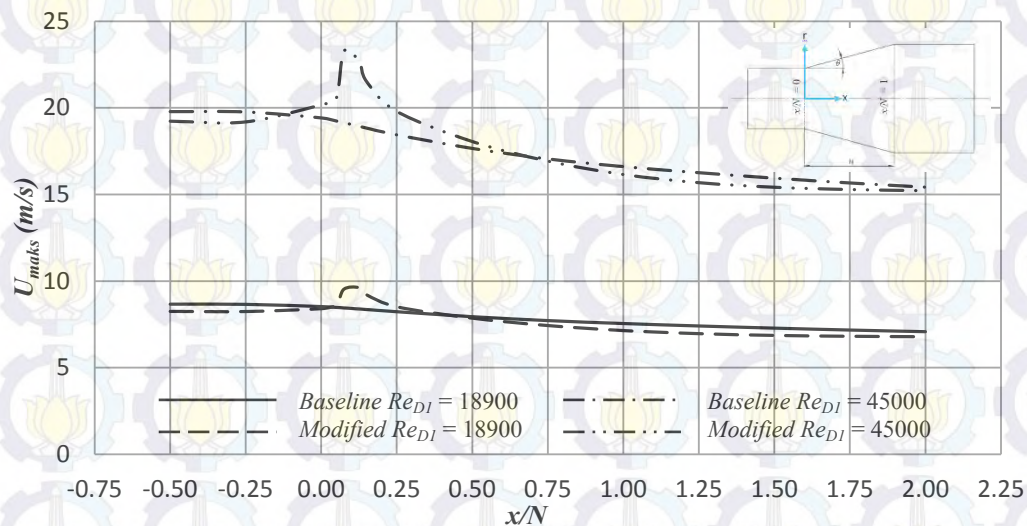
##### 4.1.1 Distribusi Perubahan Kecepatan Maksimum

*Boundary layer* pada fluida *viscous* terbentuk karena viskositas dan tegangan geser dinding. Proses penebalan *boundary layer* dan proses aliran ketika melawan *adverse pressure gradient* merupakan faktor penyebab terjadinya separasi aliran. Dampak dari separasi aliran adalah timbulnya hambatan dalam penurunan kecepatan maksimum seiring perubahan jarak di dalam *diffuser*.

Distribusi perubahan kecepatan maksimum di dalam model *conical diffuser* tanpa dan dengan penambahan *vortex generator* untuk  $Re_{D_I} = 1.89 \times 10^4$  dan  $Re_{D_I} = 4.50 \times 10^4$  dengan konfigurasi  $AR = 2, 6$  dan  $n = 8$  masing-masing ditunjukkan pada gambar 4.1, 4.2, dan 4.3. Pada gambar tersebut ditunjukkan bahwa tren grafik distribusi  $U_{maks}$  untuk  $Re_{D_I} = 1.89 \times 10^4$  maupun  $Re_{D_I} = 4.50 \times$



$10^4$  model *conical diffuser* tanpa penambahan *vortex generator* mengalami penurunan seiring dengan perubahan jarak searah aliran ( $\frac{dU_{maks}}{dx}$ ). Nilai penurunan  $U_{maks}$  dengan  $AR = 2$  untuk  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$  maupun  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$  lebih rendah dibandingkan  $AR = 6$  ataupun  $8$ . Pada jarak  $x/N = 0$  (*inlet diffuser*) sampai  $x/N = 1$  (*outlet diffuser*), aliran mengalami penurunan  $U_{maks}$  sebesar 11.48% untuk konfigurasi  $AR = 2$ , sebesar 17.65% untuk konfigurasi  $AR = 6$ , dan sebesar 17.54% untuk konfigurasi  $AR = 8$  untuk  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$ . Sedangkan untuk  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$ , aliran mengalami penurunan  $U_{maks}$  sebesar 14.48% untuk konfigurasi  $AR = 2$ , sebesar 19.70% untuk konfigurasi  $AR = 6$ , dan sebesar 20.08% untuk konfigurasi  $AR = 8$ . Penurunan kecepatan secara drastis terjadi dikarenakan pengaruh *adverse pressure gradient (APG)* yang sangat kuat akibat pembesaran penampang *diffuser*. Penurunan kecepatan mengakibatkan tegangan geser yang terjadi semakin kecil sehingga memudahkan perkembangan *boundary layer* aliran. *Boundary layer* terus berkembang dan semakin menebal seiring dengan perubahan jarak didalam *diffuser*.



**Gambar 4.1** Perbandingan distribusi kecepatan maksimum ( $U_{maks}$ ) model *conical diffuser*,  $AR = 2$ , tanpa (*baseline*) dan dengan penambahan *vortex generator* (*modified*) untuk  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$  dan  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$

Pada gambar 4.1 ditunjukkan bahwa tren grafik distribusi  $U_{max}$  untuk  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$  maupun  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$  model *conical diffuser*,  $AR = 2$ , dengan



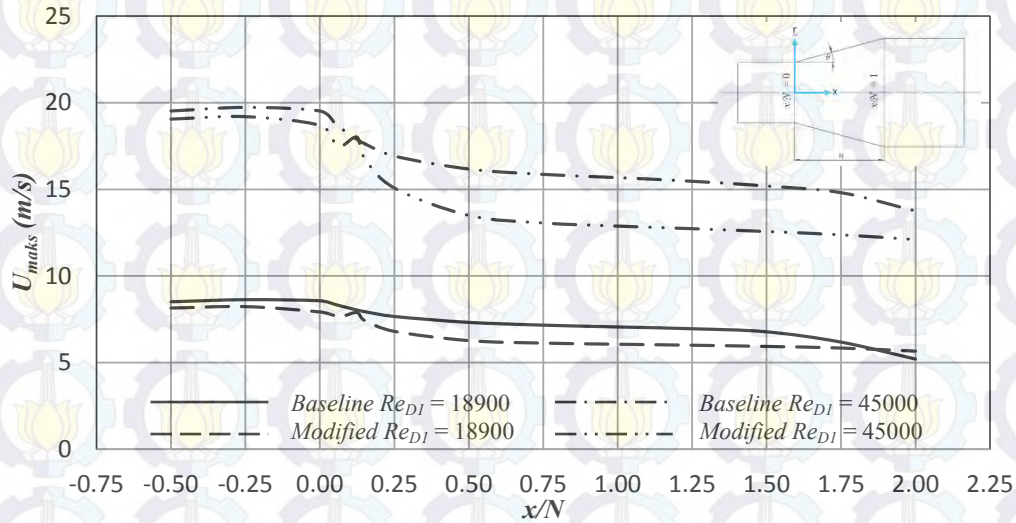
penambahan *vortex generator* mengalami peningkatan kecepatan maksimum pada posisi  $x/N = 0.075$ . Peningkatan kecepatan ini terjadi karena adanya penambahan *vortex generator* sehingga mengurangi luasan area efektif *diffuser*. Namun secara harfiah aliran yang melewati *diffuser* akan mengalami penurunan kecepatan. Pada jarak  $x/N = 0$  (*inlet diffuser*) sampai  $x/N = 1$  (*outlet diffuser*), aliran mengalami penurunan  $U_{maks}$  sebesar 5.37% untuk  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$  dan sebesar 2.74% untuk  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$  dibandingkan model tanpa penambahan *vortex generator* (*baseline*).

Modifikasi model *conical diffuser* dengan penambahan *vortex generator* diharapkan dapat memperkuat momentum aliran sehingga mampu melawan *adverse pressure gradient* yang sangat kuat akibat perubahan luas penampang yang membesar secara gradual. Kecepatan maksimum relatif konstan pada daerah *downstream channel*. Hal ini dikarenakan nilai  $(\frac{dU_{maks}}{d\frac{x}{N}})$  aliran tidak mengalami perubahan yang besar dan tidak adanya pengaruh *adverse pressure gradient*. Terjadinya penurunan nilai  $U_{maks}$  mulai dari  $x/N = 0$  sampai  $x/N = 2$  menunjukkan bahwa pada rentang jarak tersebut profil kecepatan relatif konstan saat aliran melintasi *downstream channel* (penampang konstan). Hal ini menunjukkan bahwa hingga daerah *downstream channel*, aliran mengalami *fully developed flow*.

Pada gambar 4.2 ditunjukkan bahwa tren grafik distribusi  $U_{max}$  untuk  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$  maupun  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$  model *conical diffuser*,  $AR = 6$ , dengan penambahan *vortex generator* mengalami penurunan seiring dengan perubahan jarak searah aliran  $(\frac{dU_{maks}}{d\frac{x}{N}})$ . Pada jarak  $x/N = 0$  (*inlet diffuser*) sampai  $x/N = 1$  (*outlet diffuser*), aliran dalam model dengan penambahan *vortex generator* (*modified*) mengalami peningkatan  $U_{maks}$  sebesar 14.13% untuk  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$  dan sebesar 17.86% untuk  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$ . Penurunan kecepatan mengakibatkan tegangan geser yang terjadi semakin kecil sehingga memudahkan perkembangan *boundary layer* aliran. *Boundary layer* terus berkembang dan menebal seiring dengan perubahan jarak di dalam *diffuser*. Kecepatan aliran model *modified*  $AR = 6$  daerah *diffuser* mengalami penurunan lebih yang signifikan dibandingkan  $AR = 2$ . Hal ini karena *diffuser* dengan  $AR = 6$  memiliki panjang *diffuser* yang lebih panjang daripada  $AR = 2$  sehingga besarnya pengaruh



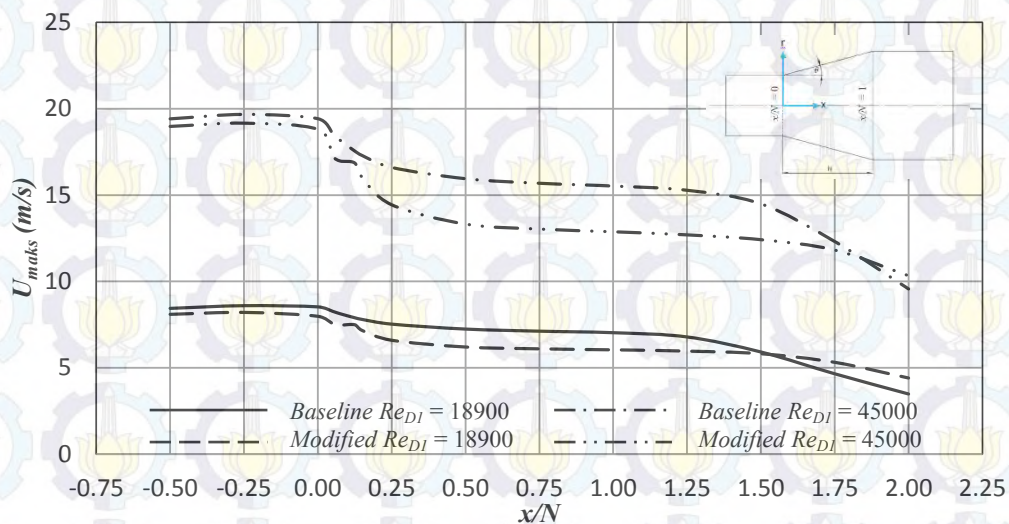
*adverse pressure gradient* pada  $AR$  6 lebih rendah. Sedangkan untuk *downstream channel*, pada daerah ini kecepatan aliran relatif konstan karena tidak adanya pengaruh *adverse pressure gradient*.



**Gambar 4.2** Perbandingan distribusi kecepatan maksimum ( $U_{maks}$ ) model *conical diffuser*,  $AR = 6$ , tanpa (*baseline*) dan dengan penambahan *vortex generator* (*modified*) untuk  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$

Pada gambar 4.3 ditunjukkan bahwa tren grafik distribusi  $U_{max}$  untuk  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  maupun  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$  model *conical diffuser*,  $AR = 8$ , dengan penambahan *vortex generator* memiliki tren grafik yang relatif serupa dengan model *conical diffuser*  $AR = 6$ . Pada jarak  $x/N = 0$  (*inlet diffuser*) sampai  $x/N = 1$  (*outlet diffuser*), aliran mengalami penurunan  $U_{maks}$  sebesar 14.09% untuk  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan mengalami peningkatan sebesar 17.05% untuk  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$  pada model *modified*.





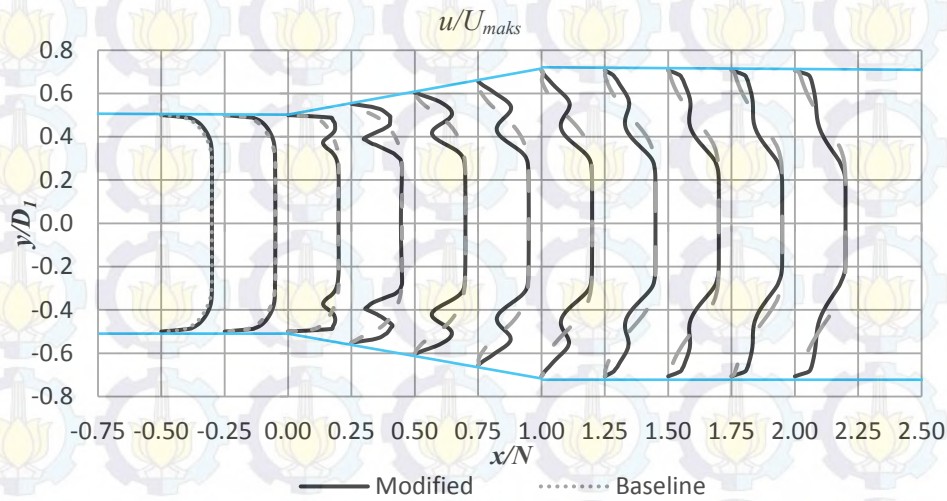
**Gambar 4.3** Perbandingan distribusi kecepatan maksimum ( $U_{maks}$ ) model *conical diffuser*,  $AR = 8$ , tanpa (*baseline*) dan dengan penambahan *vortex generator* (*modified*) untuk  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$

#### 4.1.2 Distribusi Profil Kecepatan

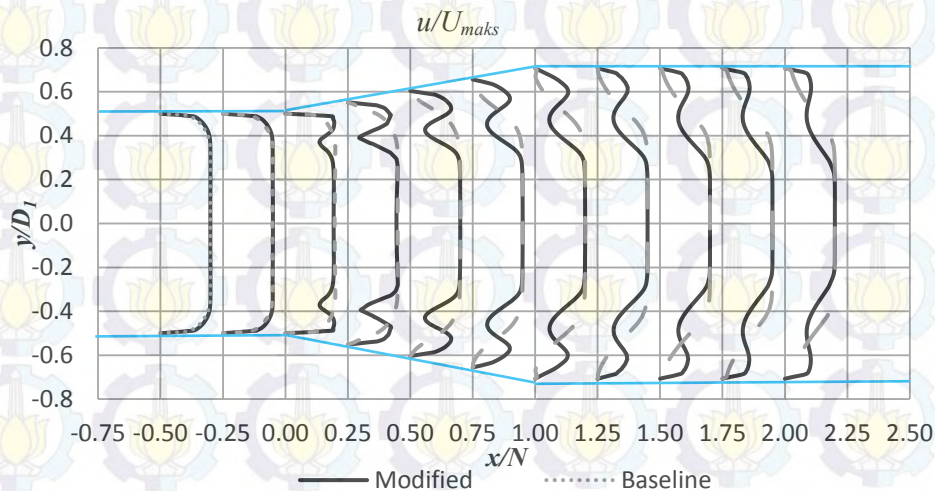
Penurunan nilai  $U_{maks}$  yang berubah-ubah seiring dengan perubahan jarak di dalam sebuah konstruksi *diffuser* dapat disebabkan karena adanya aliran balik (*back flow*). *Back flow* dapat terjadi karena efek dari separasi aliran. Gambar 4.4 menunjukkan distribusi profil kecepatan bidang vertikal (bidang  $x$ - $y$ ) konfigurasi model  $AR = 2$  untuk  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  pada model *conical diffuser* tanpa dan dengan penambahan *vortex generator*. Sedangkan untuk profil kecepatan bidang horizontal (bidang  $x$ - $z$ ) memiliki profil kecepatan yang sama dengan bidang vertikal sehingga tidak ditampilkan.

*Vortex generator* merupakan suatu alat yang digunakan untuk membangkitkan *vortex*. Pembangkitan *vortex* bertujuan untuk meningkatkan intensitas turbulensi suatu aliran agar dapat meningkatkan momentum aliran. *Vortex* yang terbentuk karena adanya *vortex generator* dapat berbeda-beda, tergantung bentuk dan dimensi dari *vortex generator* yang digunakan.





**Gambar 4.4** Perbandingan profil kecepatan pada beberapa *cross section*  $x/N$ , model *conical diffuser*,  $AR = 2$ , tanpa (*baseline*) dan dengan penambahan *vortex generator* (*modified*) untuk  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$



**Gambar 4.5** Perbandingan profil kecepatan pada beberapa *cross section*  $x/N$ , model *conical diffuser*,  $AR = 2$ , tanpa (*baseline*) dan dengan penambahan *vortex generator* (*modified*) untuk  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$

Gambar 4.4 dan 4.5 masing-masing menunjukkan perubahan profil kecepatan dari *cross section*  $x/N = -0.05$  sampai  $x/N = 2$  didalam *conical diffuser*  $AR = 2$  untuk  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$  dan  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$ . Dengan adanya ilustrasi profil kecepatan harapannya dapat memprediksi posisi awal terjadinya separasi. Profil kecepatan disajikan dalam bentuk grafik diameter inlet tak berdimensi ( $y/D_I$ ) fungsi kecepatan tak berdimensi ( $u/U_{maks}$ ) pada jarak tak berdimensi ( $x/N$ ).



$u/U_{maks}$  merupakan perbandingan antara setiap nilai kecepatan lokal pada sebuah *cross section*  $x/N$  dengan nilai  $U_{maks}$  pada *cross section* tersebut. Dengan demikian nilai maksimum  $u/U_{maks}$  adalah 1 untuk masing-masing *cross section*  $x/N$ .

Aliran memasuki *upstream channel* ( $x/N = -0.5$ ) dengan membentuk profil kecepatan dengan ketebalan *boundary layer* tertentu. Dari tampilan profil kecepatan yang ditunjukkan pada gambar 4.4, aliran dengan  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$  yang melewati konfigurasi *conical diffuser*  $AR = 2$  memiliki *boundary layer* yang lebih tebal dari pada aliran dengan  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$  (gambar 4.5), pada daerah *inlet upstream channel* untuk model *baseline* maupun model *modified*. Aliran yang mengalir melalui *upstream channel* seiring perubahan jarak aliran mengalami penebalan *boundary layer* sampai pada *inlet diffuser* ( $x/N = 0$ ). Sampai pada *inlet diffuser* aliran belum mengalami *fully developed* dikarenakan panjang *upstream channel* yang belum memenuhi batas minimum panjang saluran yang menghasilkan aliran *fully developed*. Pengaruh *vortex generator* menyebabkan perubahan profil kecepatan. Perubahan tersebut adalah harga  $u/U_{max}$  memiliki nilai lebih tinggi pada aliran di dekat *wall* untuk model *modified* daripada harga  $u/U_{max}$  pada aliran di dekat *wall* untuk model *baseline*.

Dari gambar 4.4 dan gambar 4.5 ditunjukkan bahwa hasil pemodelan numerik untuk  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$  untuk  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$  menunjukkan terjadinya separasi aliran pada model *baseline* maupun *modified*. Berdasarkan gambar profil kecepatan tersebut terlihat adanya aliran *backflow* sebagai akibat peristiwa separasi. Adanya pengaruh *friction* dan *APG* yang membesar seiring dengan pembesaran penampang *diffuser* menyebabkan aliran khususnya pada sisi *diverging wall* akan mengalami penebalan *boundary layer* dan mengalami defisit momentum. *Defisit momentum* pada aliran didekat dinding model *baseline* menyebabkan gradien kecepatan yang bernilai nol  $\left[ \left( \frac{du}{dy} \right)_{y=0} = 0 \right]$ . Pada titik ini ( $y = 0$ ) yang berada pada *diverging wall* dengan nilai  $\frac{du}{dy} = 0$  merupakan titik mulai terjadinya separasi (*separation point*). Sedangkan model *modified*, dengan adanya penambahan *vortex generator* dapat meminimalisir *deficit momentum* yang terjadi sehingga titik mulai terjadinya separasi dapat ditunda.

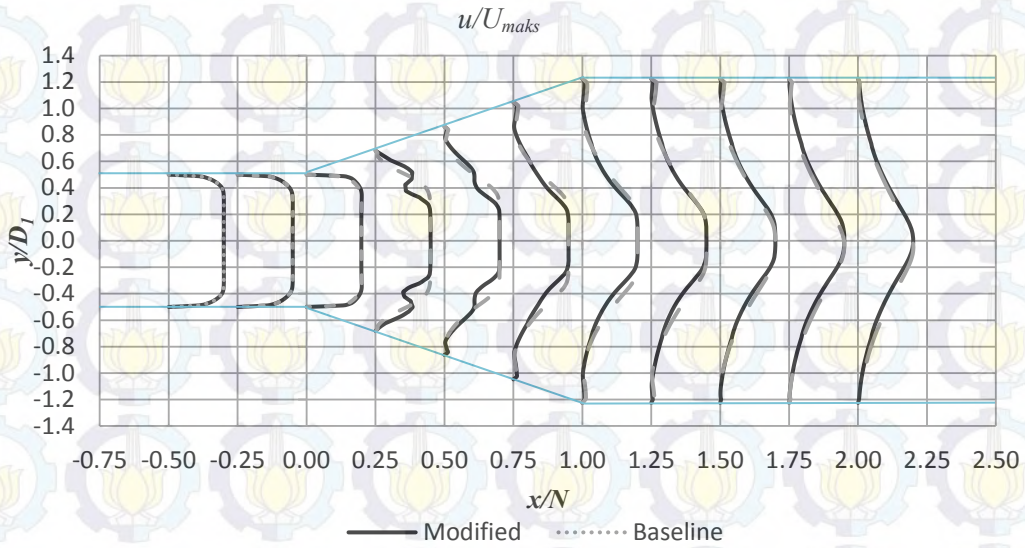


*Back flow* akibat separasi terlihat pada *cross section*  $x/N = 0.4$  untuk model *baseline*  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$ ,  $x/N = 0.5$  untuk model *baseline*  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$ ,  $x/N = 0.6$  untuk model *modified*  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$  dan untuk model *modified*  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$  tidak terjadi separasi aliran. *Back flow* terbentuk akibat momentum aliran yang semakin melemah ketika telah separasi. Fungsi dari *downstream channel* pada penelitian adalah sebagai *relaxation chamber* yang membantu aliran yang telah terseparasi untuk kembali *reattachment*. Pada model dengan  $AR = 2$ , distribusi profil kecepatan di dalam *downstream channel* memberikan indikasi bahwa aliran berusaha mengalami *reattach*.

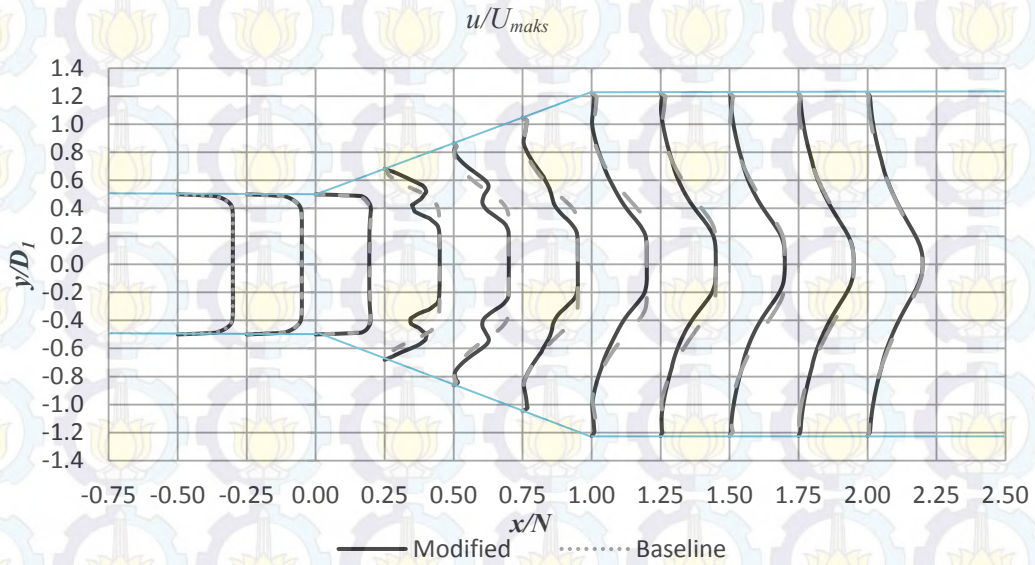
Distribusi profil kecepatan yang ditunjukkan pada gambar 4.6 dan gambar 4.7 model *conical diffuser* tanpa dan dengan penambahan *vortex generator* pada konfigurasi *area ratio*,  $AR = 6$  untuk  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$  dan  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$ . Profil kecepatan aliran memasuki *upstream channel* ( $x/N = -0.5$ ) sampai *inlet diffuser* ( $x/N = 0$ ) *conical diffuser* dengan  $AR = 6$  memiliki pola yang sama dengan *conical diffuser*  $AR = 2$ .

Pada gambar 4.6 dan 4.7 ditunjukkan bahwa hasil penelitian numerik untuk  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$  untuk  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$  menunjukkan terjadinya separasi aliran baik pada model *baseline* maupun *modified* untuk model *conical diffuser* dengan  $AR = 6$ . Berdasarkan gambar profil kecepatan tersebut terlihat adanya aliran *backflow* sebagai akibat peristiwa separasi. Dengan daerah separasi yang lebih luas dibandingkan model dengan  $AR = 2$ . *Back flow* akibat separasi terlihat pada *cross section*  $x/N = 0.15$  untuk model *baseline*  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$ ,  $x/N = 0.25$  untuk model *baseline*  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$ ,  $x/N = 0.28$  untuk model *modified*  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$ , dan  $x/N = 0.3$  untuk model *modified*  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$ . *Back flow* terbentuk akibat momentum aliran yang semakin melemah ketika telah separasi. Pada model dengan  $AR = 6$ , distribusi profil kecepatan di dalam *downstream channel* juga memberikan indikasi bahwa aliran berusaha mengalami *reattach*.





**Gambar 4.6** Perbandingan profil kecepatan pada beberapa *cross section*  $x/N$ , model *conical diffuser*,  $AR = 6$ , tanpa (*baseline*) dan dengan penambahan *vortex generator* (*modified*) untuk  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$



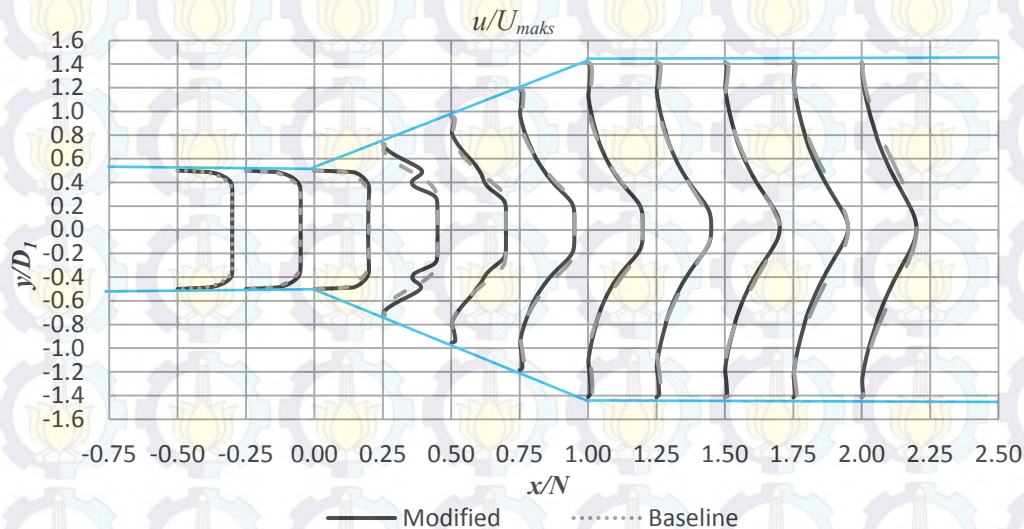
**Gambar 4.7** Perbandingan profil kecepatan pada beberapa *cross section*  $x/N$ , model *conical diffuser*,  $AR = 6$ , tanpa (*baseline*) dan dengan penambahan *vortex generator* (*modified*) untuk  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$

Distribusi profil kecepatan yang ditunjukkan pada gambar 4.8 dan gambar 4.9 model *conical diffuser* tanpa dan dengan penambahan *vortex generator* pada konfigurasi *area ratio*,  $AR = 8$  untuk  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$ . Pola aliran memasuki *upstream channel* ( $x/N = -0.5$ ) sampai *inlet diffuser* ( $x/N =$



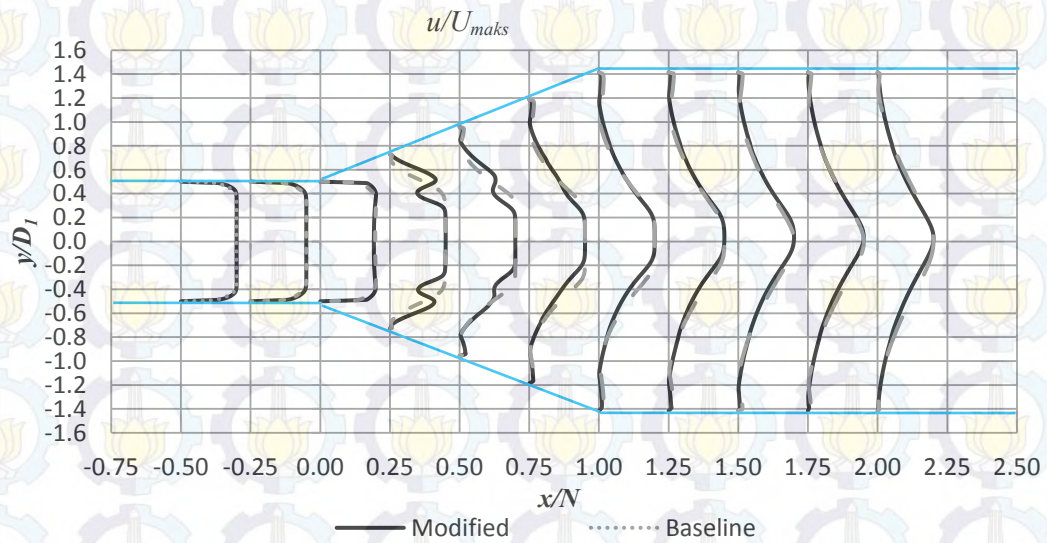
0) *conical diffuser* dengan  $AR = 8$  memiliki pola sama dengan *conical diffuser*  $AR = 2$  dan  $6$  karena konstruksi dari *upstream channel* yang sama.

Dari gambar 4.8 dan gambar 4.9 ditunjukkan bahwa hasil penelitian numerik untuk  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  untuk  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$  menunjukkan terjadinya separasi aliran baik pada model *baseline* maupun *modified*. Berdasarkan gambar profil kecepatan tersebut terlihat adanya aliran *backflow* akibat peristiwa separasi model *conical diffuser*  $AR = 8$  menunjukkan separasi aliran lebih awal dibandingkan model lainnya. Dengan adanya *vortex generator* pada model *conical diffuser*  $AR = 8$  mampu menunda separasi sampai pada  $x/N = 0.21$  untuk  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan  $x/N = 0.212$  untuk  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$ .



**Gambar 4.8** Perbandingan profil kecepatan pada beberapa *cross section*  $x/N$ , model *conical diffuser*,  $AR = 8$ , tanpa (*baseline*) dan dengan penambahan *vortex generator* (*modified*) untuk  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$





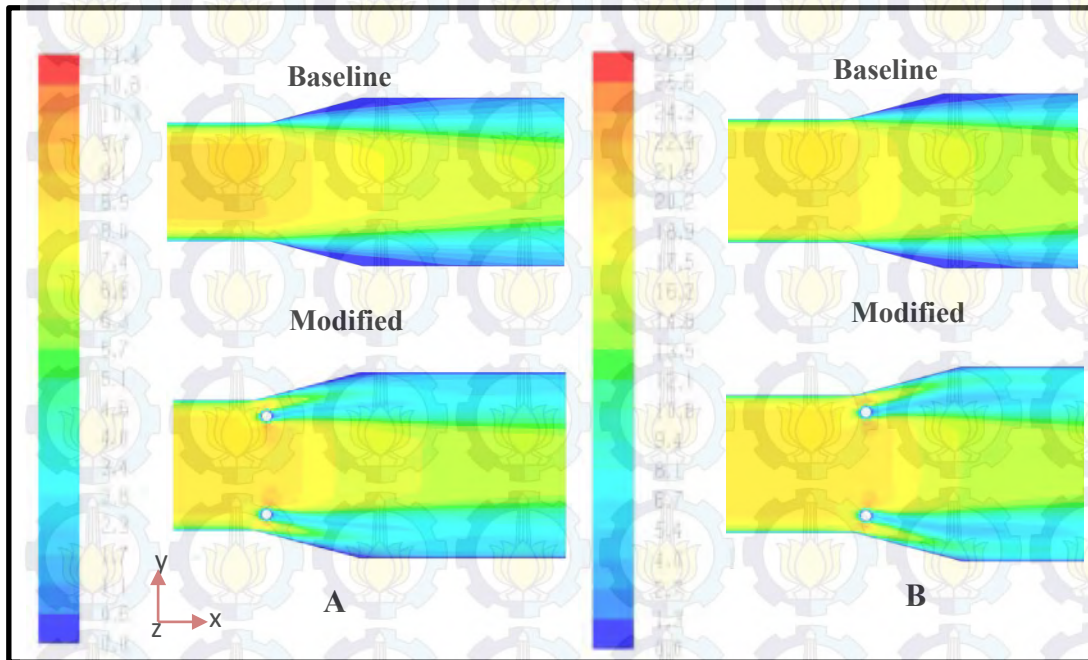
**Gambar 4.9** Perbandingan profil kecepatan pada beberapa *cross section*  $x/N$ , model *conical diffuser*, *area ratio* = 8, tanpa (*baseline*) dan dengan penambahan *vortex generator* (*modified*) untuk  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$

#### 4.1.3 Visualisasi Kecepatan Aliran

Fenomena separasi di dalam *model conical diffuser* secara detail juga dapat ditunjukkan dari visualisasi numerik dengan tampilan kontur kecepatan dan vektor kecepatan. Kontur kecepatan untuk  $AR = 2$  pada gambar 4.16 menunjukkan distribusi kecepatan secara keseluruhan di bagian bidang *midspan* horizontal model *conical diffuser*.

Kontur kecepatan model *conical diffuser*  $AR = 2$  untuk  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$  masing-masing ditunjukkan pada gambar 4.10 (a) dan (b). Gambar tersebut menunjukkan distribusi kecepatan secara keseluruhan pada bagian *midspan* horizontal yang merupakan bidang potong di tengah sumbu  $z$ .

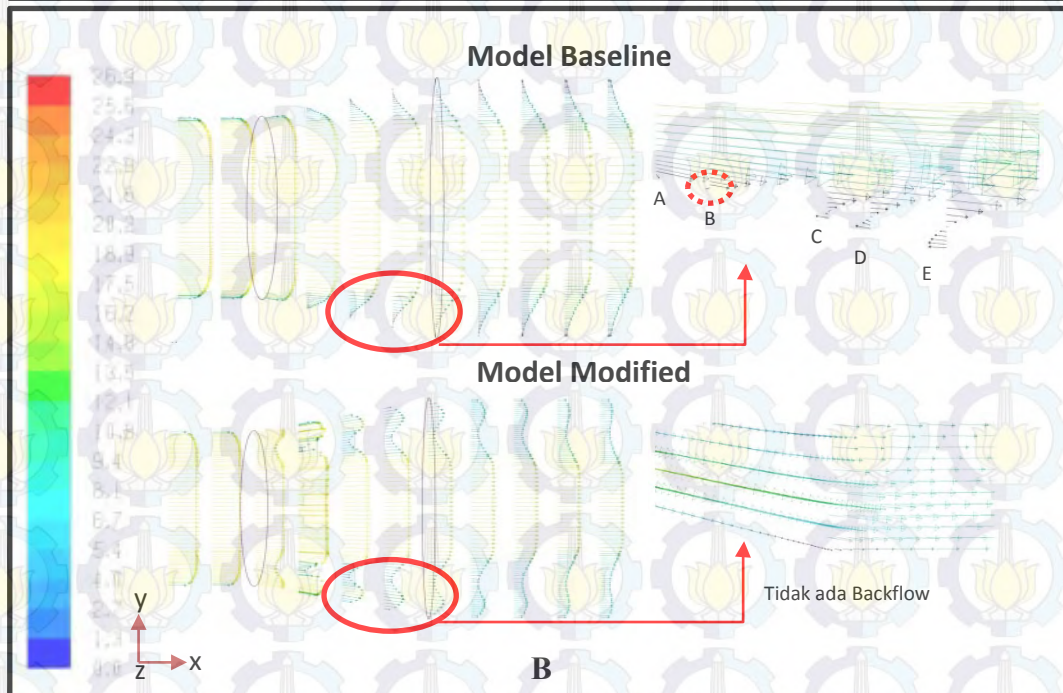
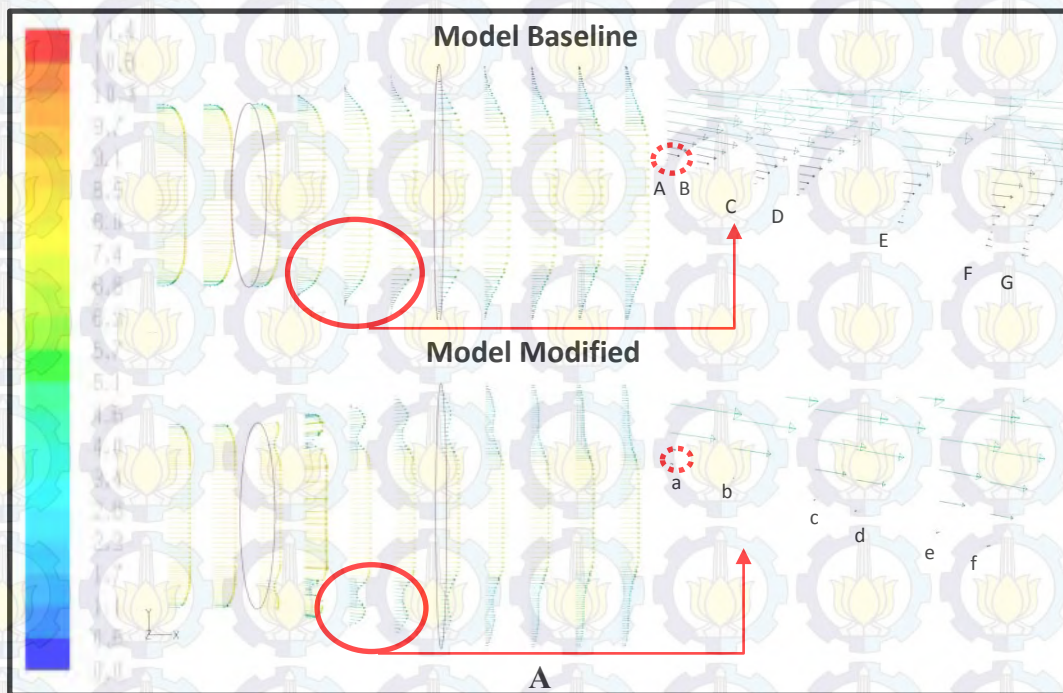




**Gambar 4.10** Visualisasi kontur kecepatan model *conical diffuser*  $AR = 2$ : (a)  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan (b)  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$  (*mapping* dengan *velocity magnitude* dalam *m/s*)

Pada sisi *upstream diffuser* kontur kecepatan berwarna hijau hingga jingga yang menunjukkan kecepatan saat memasuki *diffuser*. Setelah itu, aliran mulai memasuki area pembesaran penampang yaitu daerah *diverging*. Pada daerah *diverging*, harga kecepatan mengalami penurunan secara kontinyu hingga sisi *downstream diffuser*. Kontur kecepatan berwarna biru tua sampai biru muda dengan nilai kecepatan sekitar 0 sampai 2.3 m/s untuk  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan nilai kecepatan sekitar 0 sampai 6.70 m/s untuk  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$  disekitar *wall* dapat mengindikasikan adanya separasi. Visualisasi kontur kecepatan pada model *conical diffuser* dengan variasi *area ratio* dan bilangan *Reynolds* dapat memberikan informasi seberapa besar reduksi daerah *wake* yang terjadi untuk model dengan *vortex generator*. Hal ini ditunjukkan oleh semakin sempitnya daerah yang berwarna biru tua pada dinding *diffuser*. Namun untuk menunjukkan awal terjadinya separasi (*separation point*) dapat didukung dengan visualisasi vektor kecepatan.





Posisi gambar A:

A :  $x/N = 0.35$   
 B :  $x/N = 0.4$   
 C :  $x/N = 0.45$   
 D :  $x/N = 0.5$   
 E :  $x/N = 0.6$   
 F :  $x/N = 0.7$   
 G :  $x/N = 0.75$

a :  $x/N = 0.5$   
 b :  $x/N = 0.55$   
 c :  $x/N = 0.6$   
 d :  $x/N = 0.65$   
 e :  $x/N = 0.7$   
 f :  $x/N = 0.75$

Posisi gambar B:

A :  $x/N = 0.4$   
 B :  $x/N = 0.5$   
 C :  $x/N = 0.75$   
 D :  $x/N = 0.85$   
 E :  $x/N = 1$

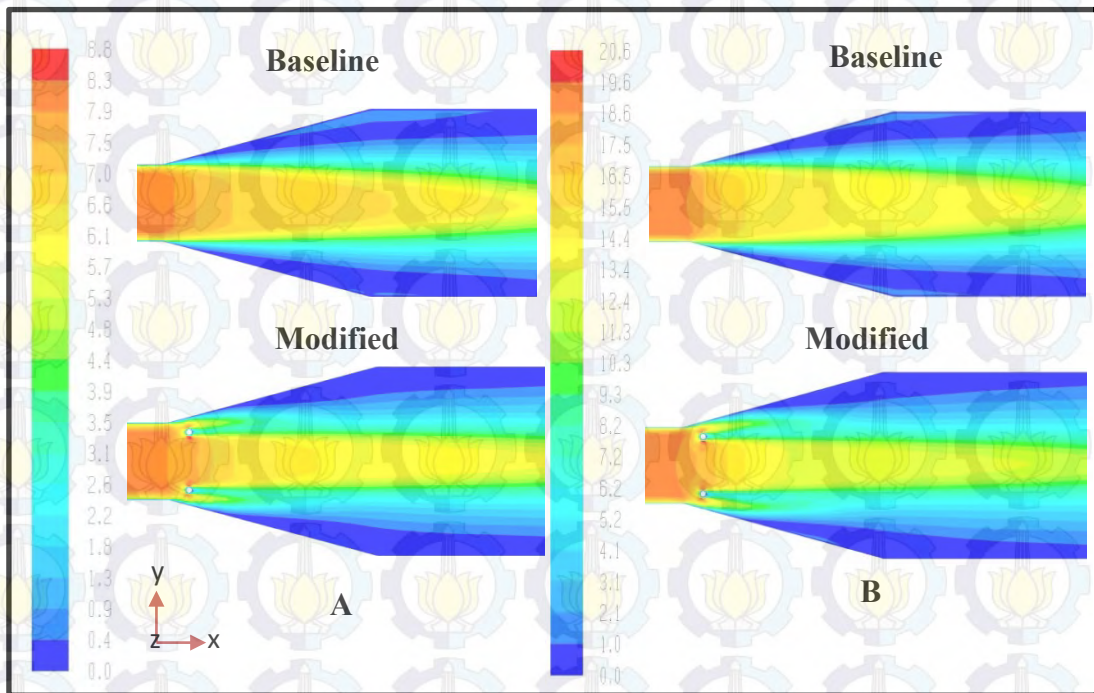
**Gambar 4.11** Visualisasi vektor kecepatan model *conical diffuser*  $AR = 2$ : (a)  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan (b)  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$  (*mapping* dengan *velocity magnitude* dalam m/s)



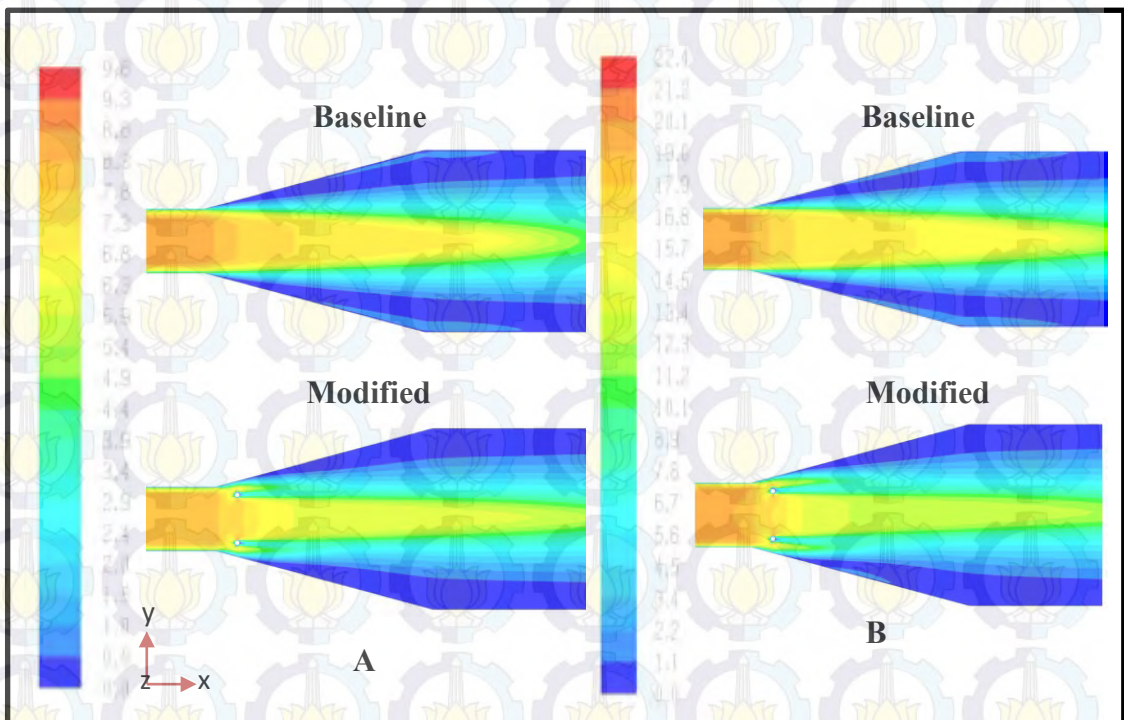
Visualisasi berupa vektor kecepatan dapat menjelaskan mengenai fenomena terjadinya separasi aliran dan terbentuknya *vortex*. *Vortex* merupakan terjadinya sebuah sirkulasi atau pusaran aliran yang terbentuk antara pertemuan *back flow* dengan aliran utama. *Separation point* dan *back flow* dapat diketahui dari tampilan vektor kecepatan. Pada gambar 4.11 ditunjukkan *separasi point* yang ditandai dengan lingkaran berwarna merah. Pada gambar tersebut terlihat bahwa adanya penundaan separasi setelah model *conical diffuser* dimodifikasi dengan *vortex generator* sejauh  $x/N = 0.05$  untuk  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$ . Sedangkan untuk model dengan  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$ , separasi yang awalnya terjadi pada model *baseline* tetapi tidak terjadi pada model *modified*. Selain efek modifikasi dari *vortex generator*, penundaan separasi juga dipengaruhi oleh besarnya bilangan *Reynolds* yang digunakan sejauh  $x/N = 0.15$  untuk  $AR = 2$ . Hal ini menunjukkan *vortex generator* dapat meningkatkan performa diffuser dengan megeliminasi separasi ataupun penundaan separasi.

Gambar 4.12 dan 4.13 masing-masing menunjukkan visualisasi kontur kecepatan untuk model dengan  $AR = 6$  dan 8. Sedangkan visualisasi vektor kecepatan untuk model tersebut masing-masing ditunjukkan oleh gambar 4. 14 dan 4.15. Fenomena yang ditunjukkan oleh model *conical diffuser* dengan *area ratio* berbeda,  $AR = 6$  dan 8, memiliki perbedaan yang tidak signifikan dibandingkan model *conical diffuser* dengan *area ratio* ( $AR$ ) = 2.



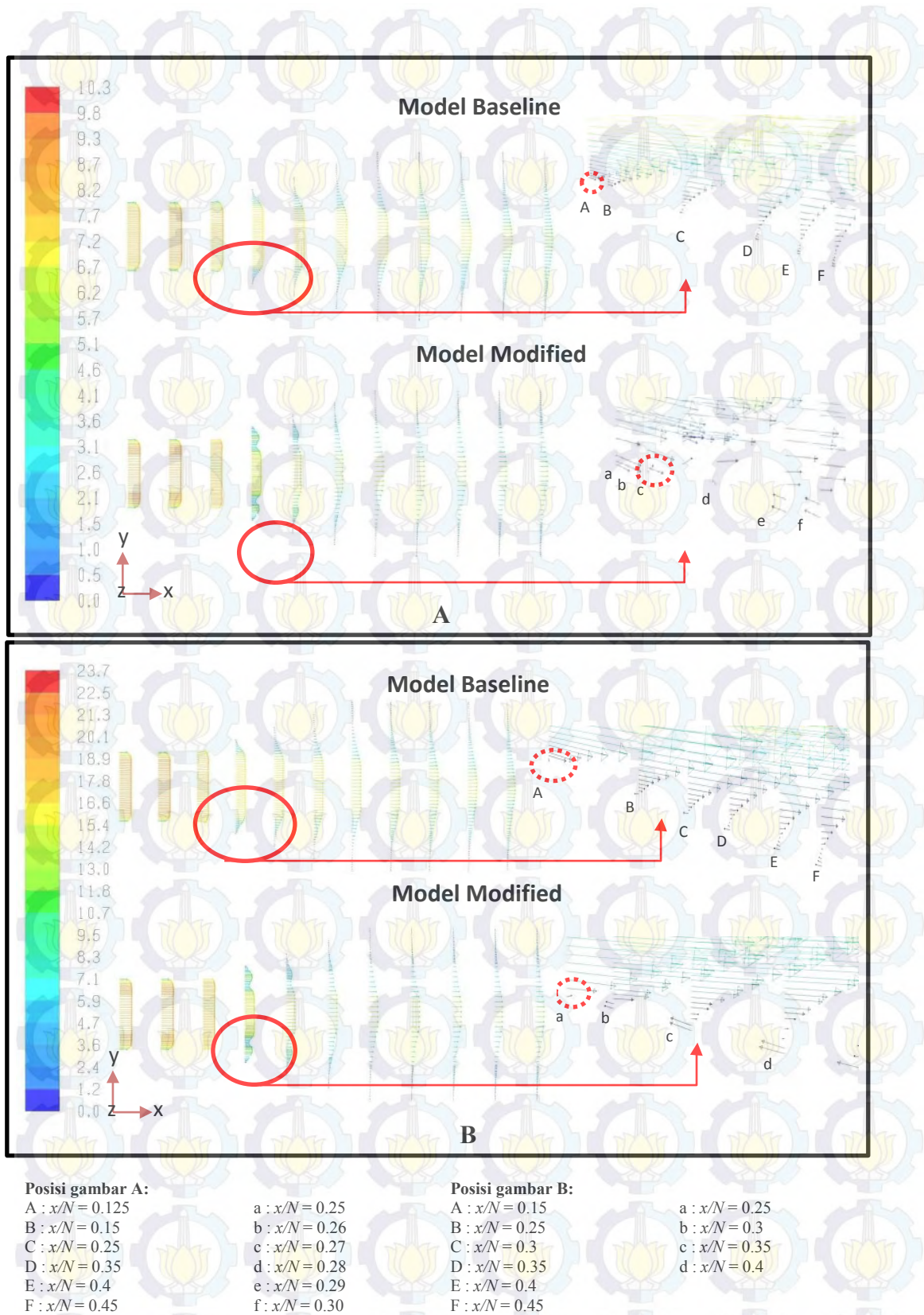


**Gambar 4.12** Visualisasi kontur kecepatan model *conical diffuser*  $AR = 6$ : (a)  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan (b)  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$  (mapping dengan velocity magnitude dalam m/s)



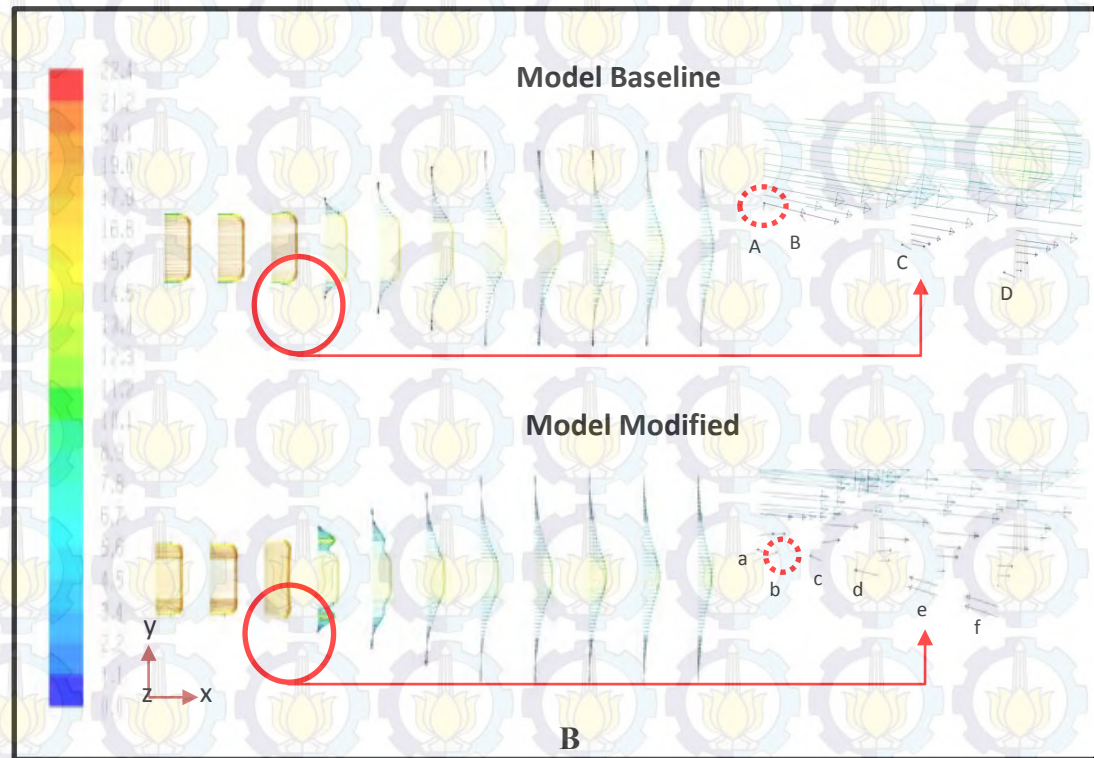
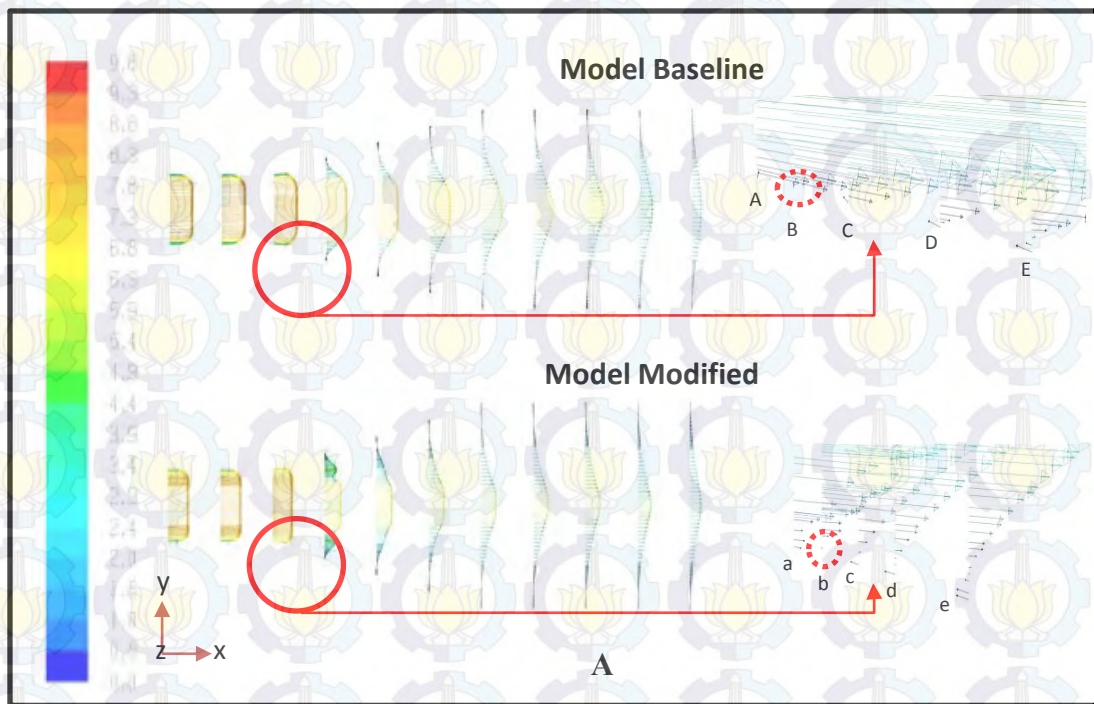
**Gambar 4.13** Visualisasi kontur kecepatan model *conical diffuser*  $AR = 8$ : (a)  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan (b)  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$  (mapping dengan velocity magnitude dalam m/s)





**Gambar 4.14** Visualisasi vektor kecepatan model *conical diffuser*  $AR = 6$ : (a)  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan (b)  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$  (*mapping* dengan *velocity magnitude* dalam m/s)





**Posisi gambar A:**

A :  $x/N = 0.075$   
 B :  $x/N = 0.085$   
 C :  $x/N = 0.1$   
 D :  $x/N = 0.125$   
 E :  $x/N = 0.5$

a :  $x/N = 0.2$   
 b :  $x/N = 0.21$   
 c :  $x/N = 0.22$   
 d :  $x/N = 0.23$   
 e :  $x/N = 0.25$

**Posisi gambar B:**

A :  $x/N = 0.09$   
 B :  $x/N = 0.1$   
 C :  $x/N = 0.125$   
 D :  $x/N = 0.15$

a :  $x/N = 0.21$   
 b :  $x/N = 0.212$   
 c :  $x/N = 0.22$   
 d :  $x/N = 0.23$   
 e :  $x/N = 0.24$   
 f :  $x/N = 0.25$

**Gambar 4.15** Visualisasi vektor kecepatan model *conical diffuser*  $AR = 8$ : (a)  $Re_{Dl} = 1.89 \times 10^4$  dan (b)  $Re_{Dl} = 4.50 \times 10^4$  (mapping dengan velocity magnitude dalam m/s)



*Separation point* untuk model *conical diffuser* dengan *area ratio* 2, 6, dan 8 untuk  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$  dan  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$  untuk model *baseline* maupun *modified* ditunjukkan pada tabel 4.1. Dari data tersebut terlihat bahwa penundaan separasi dipengaruhi oleh bilangan *Reynolds* dan *vortex generator* yang digunakan. Semakin besar bilangan *Reynolds* yang digunakan, penundaan separasi lebih kebelakang. Sedangkan untuk *area ratio*, semakin besar *area ratio* maka separasi terjadi lebih awal dibandingkan *area ratio* yang bernilai lebih kecil. Perbesaran (*detail*) vektor kecepatan pada gambar 4.11, gambar 4.14 dan gambar 4.15 dapat menunjukkan letak titik separasi (*separation point*) dengan lebih detil.

**Tabel 4.1** Posisi *separation point* pada model *conical diffuser* tanpa dan dengan *vortex generator* variasi *area ratio* (*AR*) dan bilangan *Reynolds* ( $Re_{DI}$ )

<i>Area Ratio</i>	Bilangan <i>Reynolds</i> ( $Re_{DI}$ )	Posisi <i>Separation point</i> ( $x/N$ )	
		<i>Baseline</i>	<i>Modified</i>
2	$1.89 \times 10^4$	0.350	0.500
	$4.50 \times 10^4$	0.400	-
6	$1.89 \times 10^4$	0.125	0.270
	$4.50 \times 10^4$	0.150	0.280
8	$1.89 \times 10^4$	0.075	0.210
	$4.50 \times 10^4$	0.090	0.212

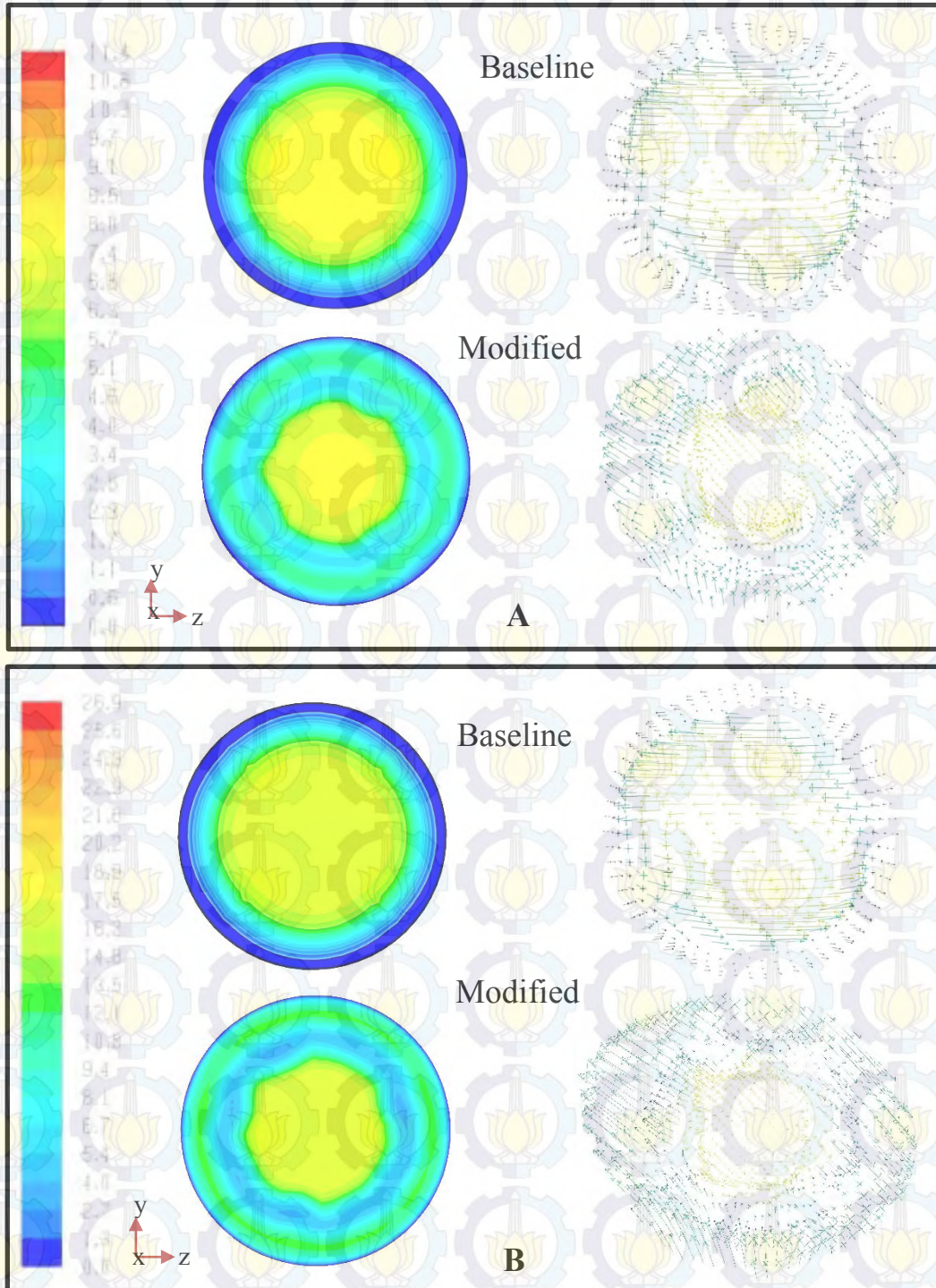
#### 4.1.4 Visualisasi Aliran Sekunder Pada Bidang Melintang

Aliran sekunder merupakan separasi aliran tiga dimensi dimana aliran mengandung komponen aliran dengan arah orthogonal terhadap arah aliran utama. Aliran sekunder terbentuk akibat separasi aliran yang terjadi. Umumnya aliran sekunder yang terjadi mengakibatkan kerugian berupa *blockage effect*. Namun dalam model *conical diffuser* yang dimodifikasi dengan penambahan *vortex generator*, pengaruh *blockage effect* membawa manfaat untuk meningkatkan momentum aliran pada dinding sehingga separasi aliran yang terjadi dapat tertunda. Separasi lokal yang terjadi pada *vortex generator* menyebabkan daerah efektif aliran utama lebih luas, dimana daerah *vortex* (warna biru tua) untuk model *modified* lebih sempit dibandingkan model *baseline*.

Fenomena terbentuknya aliran sekunder di dalam model *conical diffuser* ditunjukkan oleh gambar 4.16, 4.17, dan 4.18. Pemilihan bidang melintang  $x/N =$

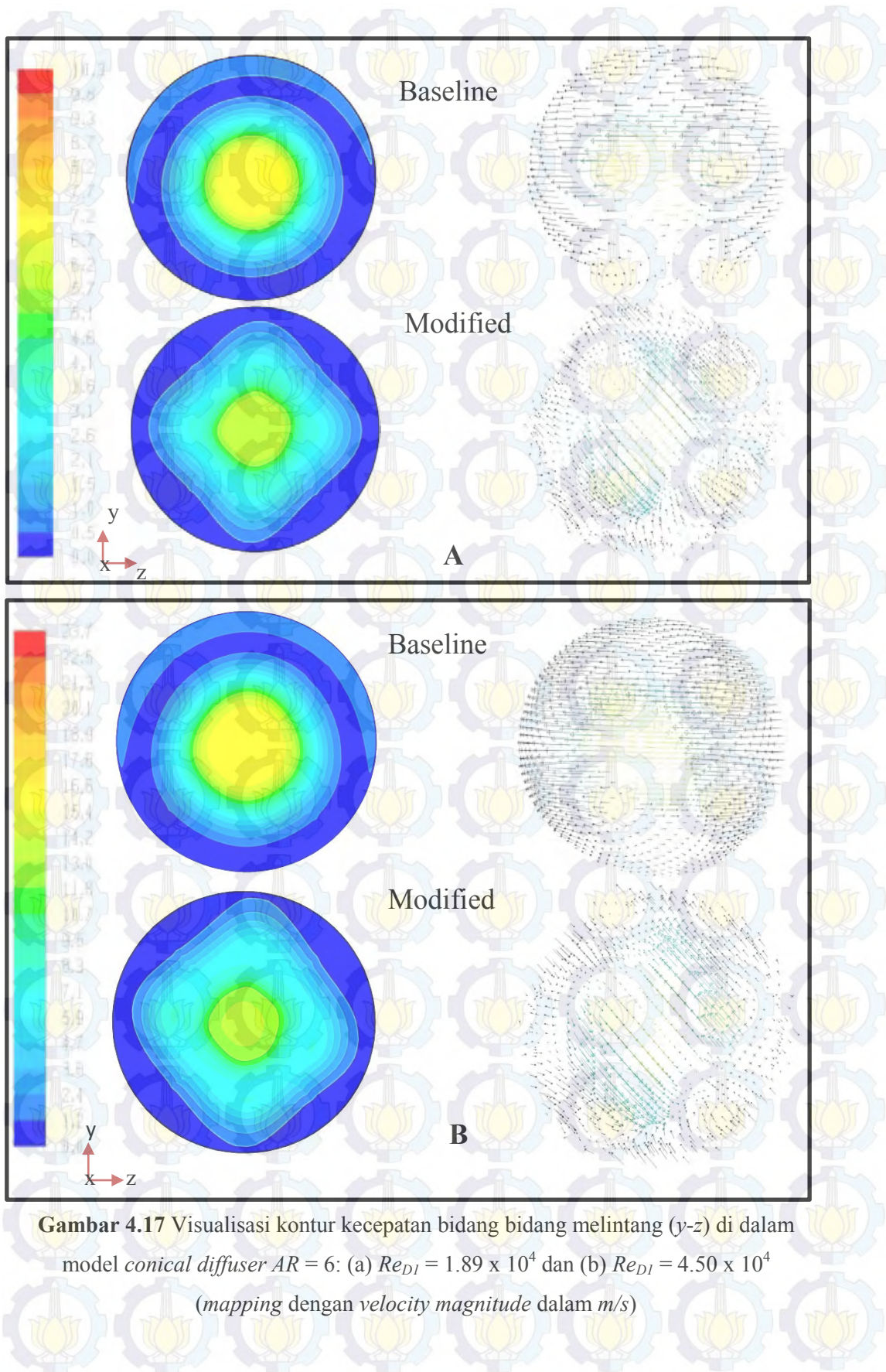


0.75 dikarenakan pada posisi tersebut telah terjadi *backflow* (warna biru tua) sehingga proses pengamatan timbulnya aliran sekunder pada *diffuser* lebih mudah diamati.



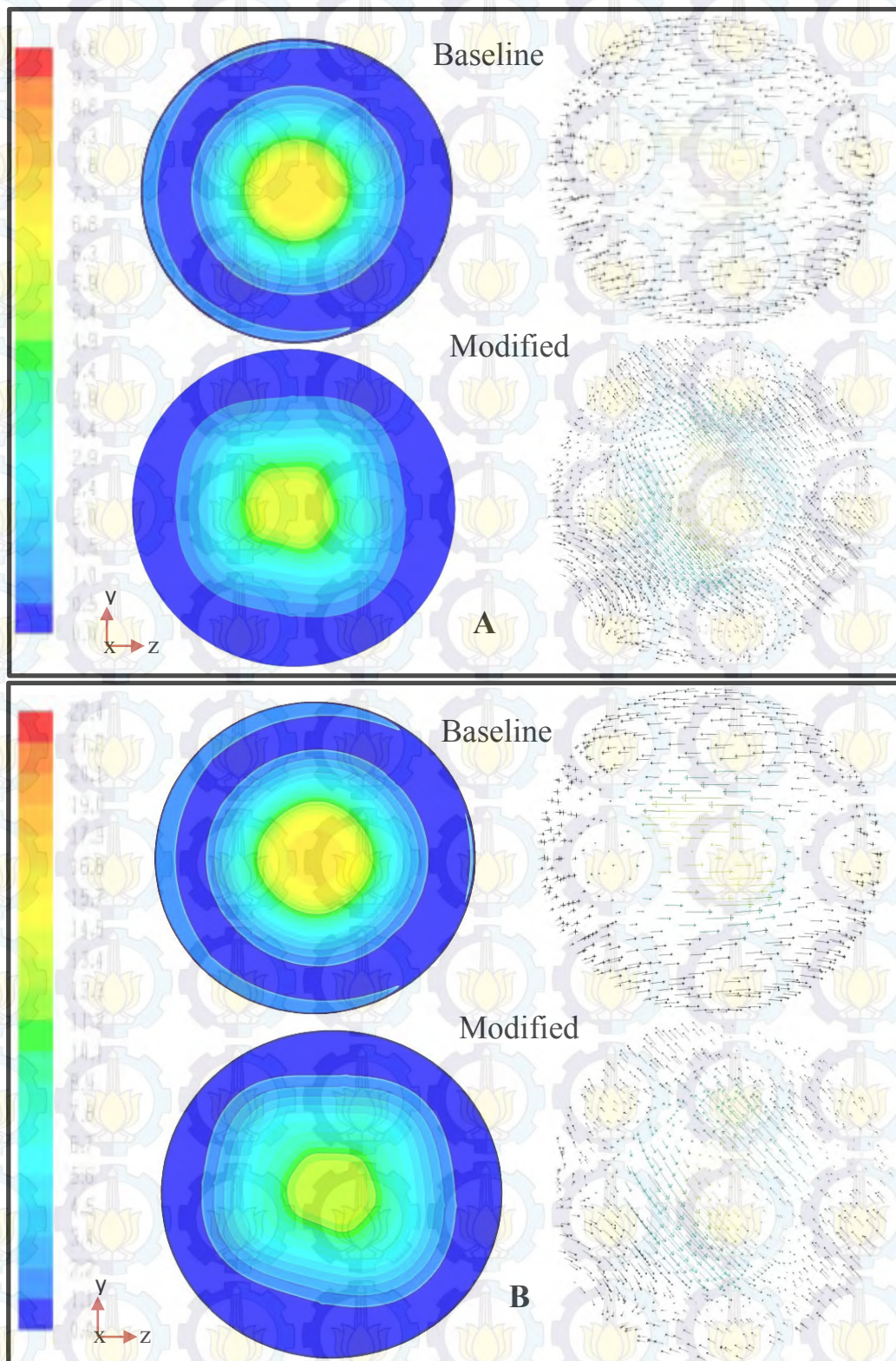
**Gambar 4.16** Visualisasi kontur dan vektor kecepatan bidang bidang melintang ( $y$ - $z$ ) di dalam model *conical diffuser*  $AR = 2$ : (a)  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan (b)  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$  (mapping dengan *velocity magnitude* dalam  $m/s$ )





**Gambar 4.17** Visualisasi kontur kecepatan bidang bidang melintang ( $y$ - $z$ ) di dalam model *conical diffuser*  $AR = 6$ : (a)  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan (b)  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$  (mapping dengan *velocity magnitude* dalam  $m/s$ )





**Gambar 4.18** Visualisasi kontur kecepatan bidang bidang melintang (y-z) di dalam model *conical diffuser*  $AR = 8$ : (a)  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan (b)  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$  (*mapping* dengan *velocity magnitude* dalam m/s)



Kondisi aliran primer memiliki orientasi utama yaitu searah aliran (*streamwise*, arah sumbu  $x$  positif). Pada gambar 4.16, 4.17 dan 4.18, komponen vektor kecepatan yang ditampilkan hanya komponen vektor arah  $y$  dan  $z$ . Hal ini bertujuan untuk memvisualisasikan aliran sekunder lebih jelas sehingga dapat lebih jelas diamati.

Pada vektor aliran sekunder gambar di bawah ini, terlihat bahwa arah panah vektor memiliki orientasi ke arah sumbu  $y$ , ke arah sumbu  $z$ , ataupun ke arah resultan dari kedua sumbu tersebut. Berdasarkan fenomena ini dapat dijelaskan bahwa aliran sekunder memiliki sifat bergerak sirkulasi pada arah yang berlainan dengan arah aliran utama. Aliran sekunder pada *diffuser* dengan *vortex generator* terlihat lebih acak dibandingkan dengan aliran sekunder pada *diffuser* tanpa *vortex generator*.

## 4.2 Profil Intensitas Turbulensi

### 4.2.1 Distribusi Perubahan Intensitas Turbulensi

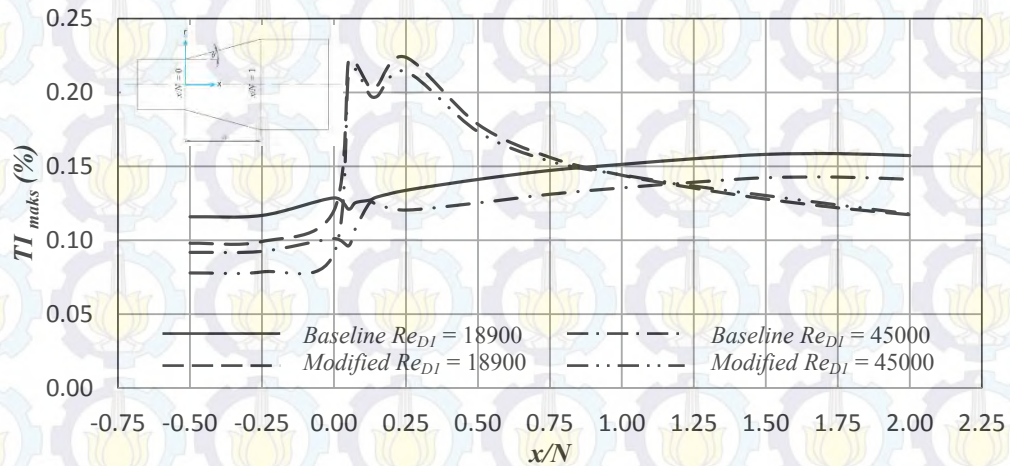
Salah satu parameter yang menunjukkan turbulensi suatu aliran adalah intensitas turbulensi. Intensitas turbulensi adalah bilangan tak berdimensi yang dipengaruhi oleh standard deviasi kecepatan aliran dan kecepatan rata-rata fluida. Intensitas turbulensi merupakan suatu skala yang disajikan dalam persentase tersusun atas tiga kecepatan arah aliran yaitu kecepatan aliran ke arah aksial, radial, dan tangensial. Semakin besar standar deviasi kecepatan aliran maka semakin besar pula intensitas turbulensi. Sebaliknya apabila kecepatan rata-rata fluida semakin besar, nilai intensitas turbulensi yang terjadi akan semakin kecil.

*Vortex* yang terbentuk karena adanya *vortex generator* menyebabkan intensitas turbulensi aliran dibelakang *vortex generator* meningkat. Seiring meningkatnya intensitas turbulensi maka semakin meningkat pula momentum aliran pada *wall diffuser*. Harapannya dengan semakin meningkatnya momentum aliran, aliran akan mampu melawan *adverse pressure gradient* dan tegangan geser yang terjadi, sehingga separasi yang terjadi dapat tertunda.

Gambar 4.19 menunjukkan perbandingan distribusi intensitas turbulensi maksimum model *conical diffuser*,  $AR = 2$ , tanpa dan dengan penambahan *vortex generator* untuk  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$  dan  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$ . Pada gambar ini



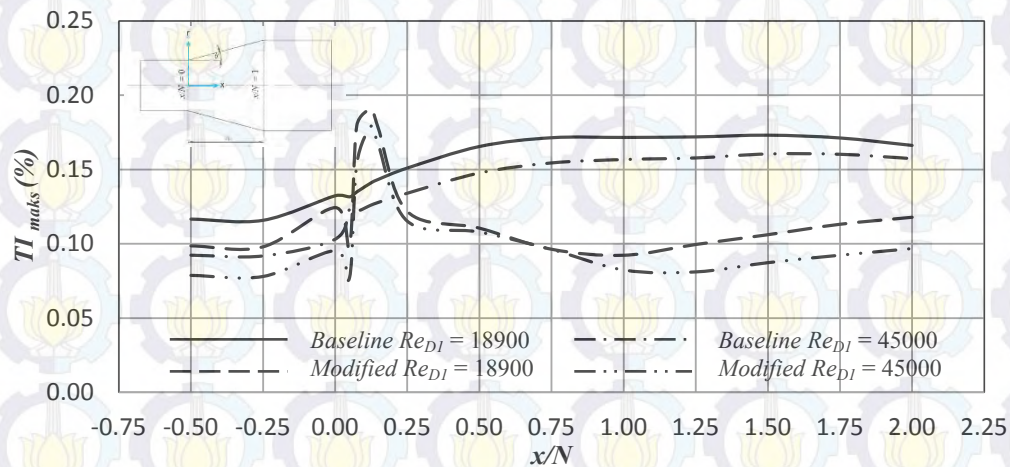
ditunjukkan peningkatan intensitas turbulensi yang drastis setelah melewati posisi  $x/N = 0$  untuk model *modified*. Hal ini karena adanya penundaan separasi akibat peningkatan momentum aliran yang mampu melawan *adverse pressure gradient* dan efek gesekan, dimana dengan tertundanya separasi performa *conical diffuser*  $AR = 2$  mengalami peningkatan.



**Gambar 4.19** Perbandingan distribusi intensitas turbulensi maksimum ( $TI_{maks}$ ) model *conical diffuser*,  $AR = 2$ , tanpa (*baseline*) dan dengan penambahan *vortex generator* (*modified*) untuk  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$

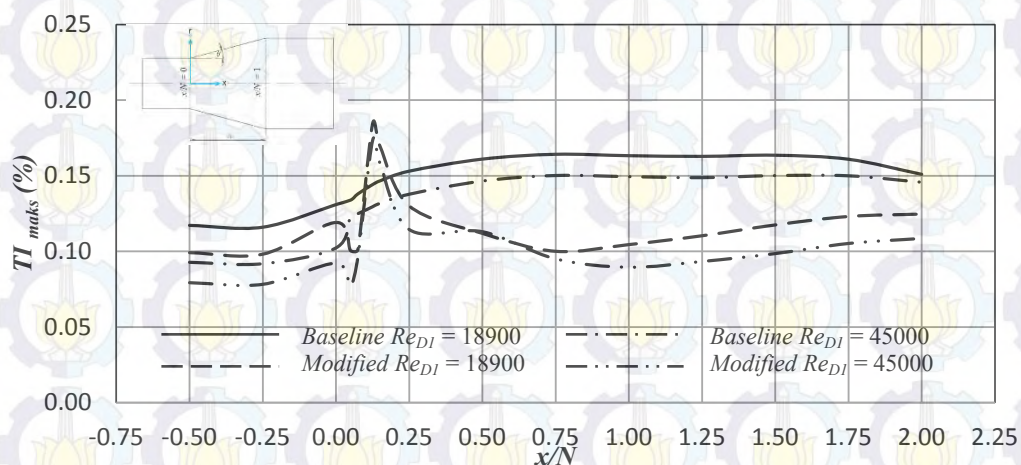
Gambar 4.20 menunjukkan perbandingan distribusi intensitas turbulensi maksimum model *conical diffuser*,  $AR = 6$ , tanpa dan dengan penambahan *vortex generator* untuk  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$ . Dari gambar ini menunjukkan penurunan intensitas turbulensi sesaat setelah melewati posisi  $x/N = 0$  untuk model *modified* kemudian mengalami peningkatan yang drastis setelah melewati posisi  $x/N = 0.125$ . Hal ini menunjukkan adanya peningkatan momentum aliran untuk model *modified* dimana pada posisi tersebut aliran melewati *vortex generator*. Pemasangan *vortex generator* pada model *conical diffuser* untuk  $AR = 6$  menunjukkan penundaan separasi dan peningkatan performa *diffuser*.





**Gambar 4.20** Perbandingan distribusi intensitas turbulensi maksimum ( $TI_{maks}$ ) model *conical diffuser*,  $AR = 6$ , tanpa (*baseline*) dan dengan penambahan *vortex generator* (*modified*) untuk  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$

Gambar 4.21 menunjukkan perbandingan distribusi intensitas turbulensi maksimum model *conical diffuser*,  $AR = 8$ , tanpa dan dengan penambahan *vortex generator* untuk  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$ . Dari gambar ini menunjukkan tren grafik yang tidak jauh berbeda dengan model *conical diffuser*  $AR = 6$ . Ketiga model *conical diffuser* dengan variasi  $AR$  menunjukkan bahwa nilai intensitas turbulensi maksimum semakin menurun seiring dengan perubahan geometri *conical diffuser* (semakin besarnya  $AR$ ).



**Gambar 4.21** Perbandingan distribusi intensitas turbulensi maksimum ( $TI_{maks}$ ) model *conical diffuser*,  $AR = 8$ , tanpa (*baseline*) dan dengan penambahan *vortex generator* (*modified*) untuk  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$

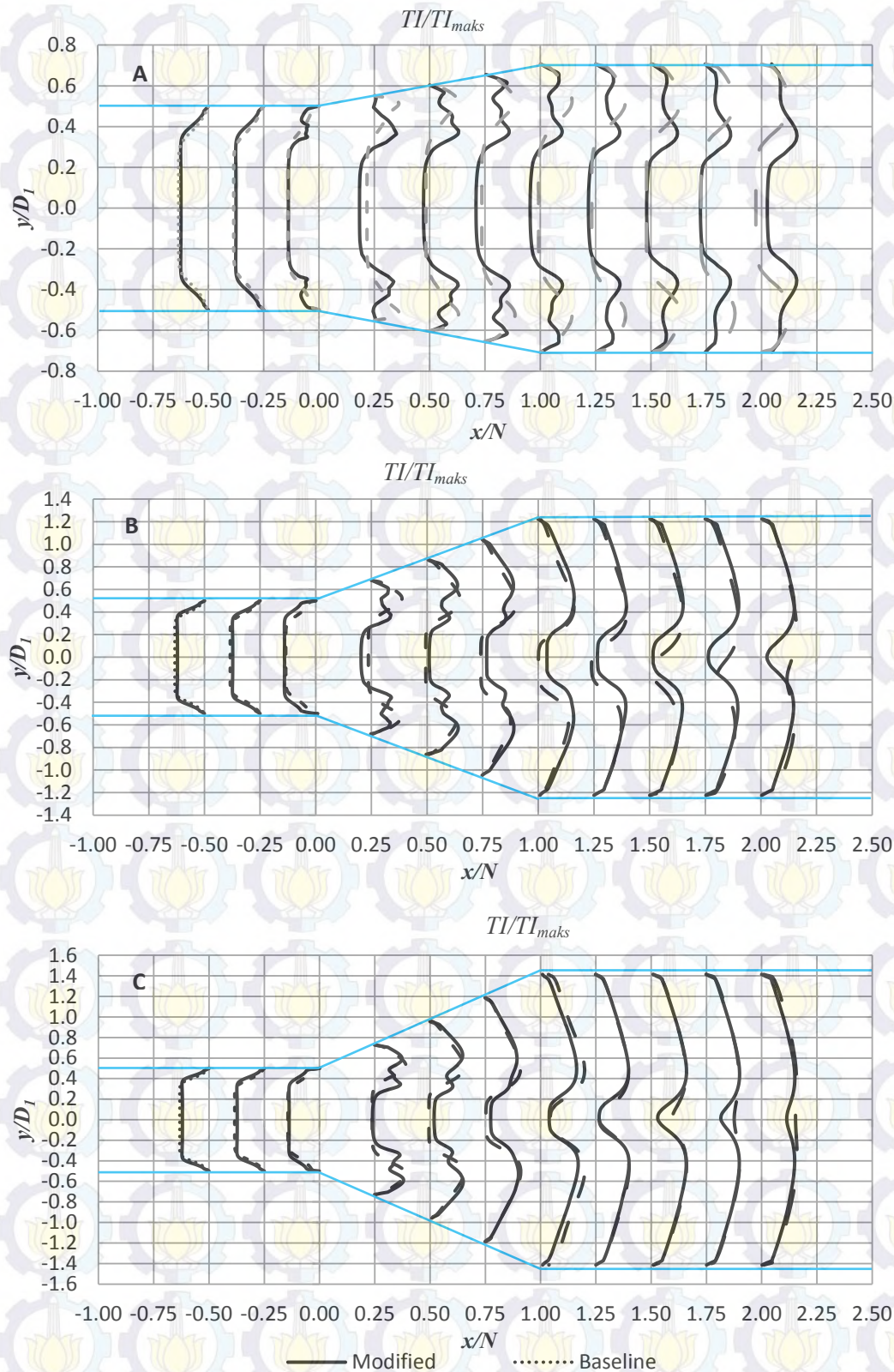


#### 4.2.2 Distribusi Profil Intensitas Turbulensi

Perubahan profil intensitas turbulensi pada model *conical diffuser* dengan variasi  $AR$  untuk  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  ditunjukkan pada gambar 4.22. Profil intensitas turbulensi merupakan profil yang terbentuk berlawanan dengan profil kecepatan. *Vortex generator* merupakan suatu alat yang digunakan untuk membangkitkan *vortex*. Pembangkitan *vortex* bertujuan untuk meningkatkan intensitas turbulensi suatu aliran agar dapat meningkatkan momentum aliran. *Vortex* yang terbentuk karena adanya *vortex generator* dapat berbeda-beda, tergantung bentuk dan dimensi dari *vortex generator* yang digunakan.

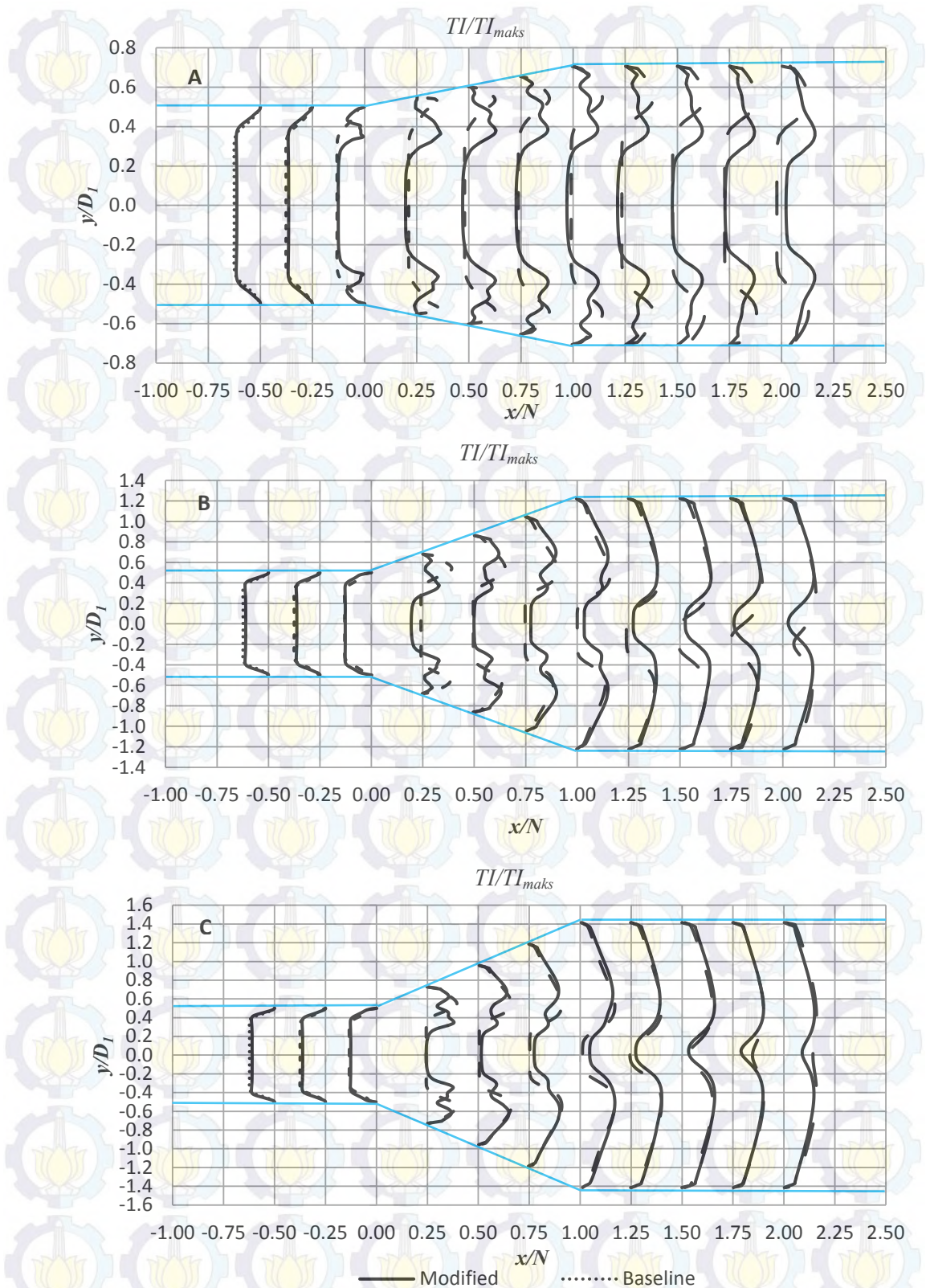
Gambar 4.22 (a) menunjukkan perubahan profil intensitas turbulensi dari *cross section*  $x/N = -0.05$  sampai  $x/N = 2$  didalam *conical diffuser*  $AR = 2$  untuk  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$ , gambar 4.22 (b) menunjukkan perubahan profil intensitas turbulensi didalam *conical diffuser*  $AR = 6$ , dan gambar 4.22 (c) menunjukkan perubahan profil intensitas turbulensi didalam *conical diffuser*  $AR = 8$  pada model *conical diffuser* tanpa dan dengan penambahan *vortex generator*. Sedangkan untuk  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$  ditampilkan pada gambar 4.23. Profil intensitas turbulensi disajikan dalam bentuk grafik diameter inlet tak berdimensi ( $y/D_1$ ) fungsi intensitas turbulensi tak berdimensi ( $TI/TI_{maks}$ ) pada jarak tak berdimensi ( $x/N$ ).  $TI/TI_{maks}$  merupakan perbandingan antara setiap nilai intensitas turbulensi lokal pada sebuah *cross section*  $x/N$  dengan nilai  $TI_{maks}$  pada *cross section* tersebut. Nilai maksimum  $TI/TI_{maks}$  adalah 1 untuk masing-masing *cross section*  $x/N$ .





**Gambar 4.22** Perbandingan profil intensitas turbulensi pada beberapa *cross section*  $x/N$ , model *conical diffuser*, area ratio = 2 (a), 6 (b), dan 8 (c), tanpa (*baseline*) dan dengan penambahan *vortex generator* (*modified*) untuk  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$





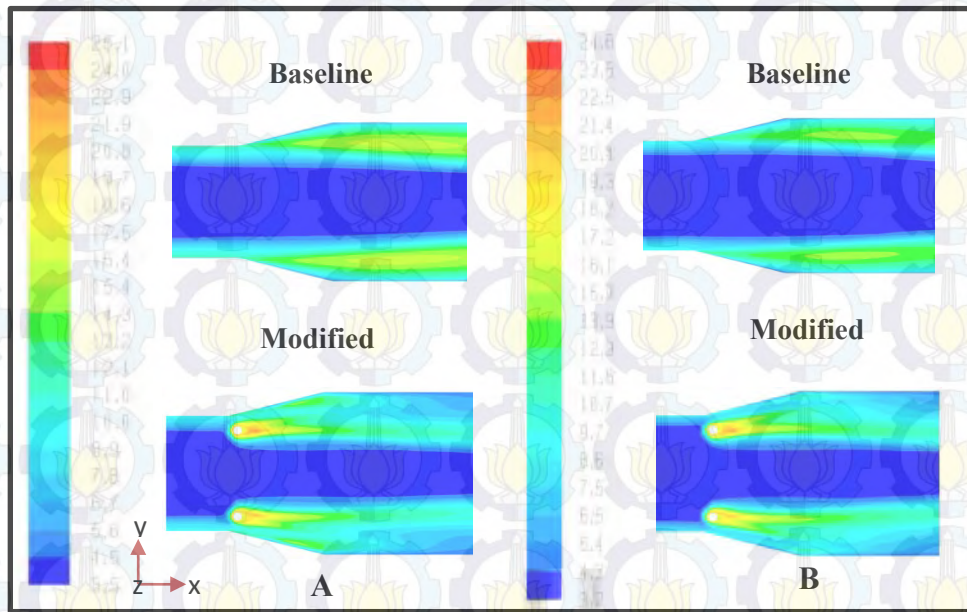
**Gambar 4.23** Perbandingan profil intensitas turbulensi pada beberapa *cross section*  $x/N$ , model *conical diffuser*, area ratio = 2 (a), 6 (b), 8 (c), tanpa (*baseline*) dan dengan penambahan *vortex generator* (*modified*) untuk  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$



Turbulensi juga merupakan salah satu sifat fluida yang menunjukkan fluktuasi aliran, dimana intensitas turbulensi menyatakan adanya turbulensi. Visualisasi kontur intensitas turbulensi model *conical diffuser* ( $2\theta = 30^\circ$ , *area ratio* = 2 untuk  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$  dan  $Re_{DI} = 4.5 \times 10^4$  tanpa dan dengan VG ditunjukkan pada gambar 4.24. Sedangkan visualisasi kontur intensitas turbulensi model *conical diffuser*,  $AR = 6$  dan  $8$  tanpa dan dengan VG masing-masing ditunjukkan pada gambar 4.25 dan 4.26. Nilai intensitas turbulensi dipengaruhi oleh nilai standar deviasi kecepatan aliran, dimana terdiri dari komponen kecepatan aksial, radial, dan tangensial. Selain itu, dipengaruhi pula oleh nilai kecepatan rata-rata pada daerah diverging.

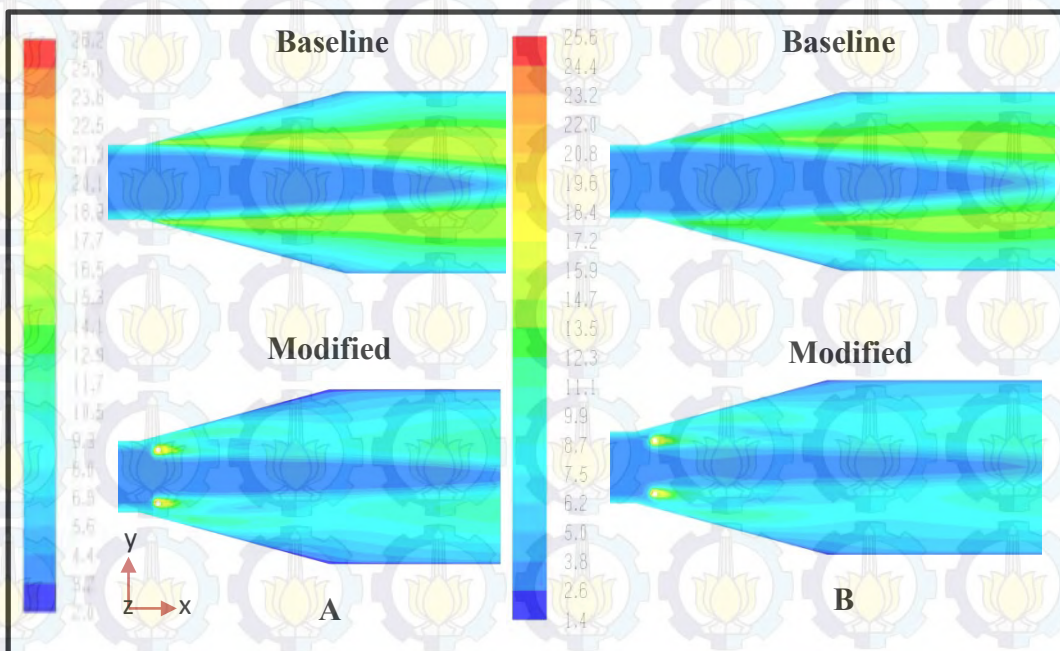
Visualisasi kontur intensitas turbulensi dapat memberikan informasi mengenai perubahan nilai intensitas turbulensi yang terjadi dari *upstream* sampai *downstream channel* yang ditunjukkan oleh gradasi warna yang terbentuk. Kontur intensitas turbulensi pada *inlet diffuser* sebelum memasuki sisi *diverging* menunjukkan nilai intensitas turbulensi yang rendah (warna lebih tua). Pada dinding sisi *diverging* memiliki nilai intensitas turbulensi yang lebih tinggi ditunjukkan dengan warna yang hijau atau kuning kehijauan. Semakin besar bilangan *Reynold* menunjukkan perbedaan pola warna yang terbentuk. Model dengan  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$  memiliki nilai intensitas turbulensi maksimum dan  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$  memiliki nilai intensitas turbulensi minimum.





**Gambar 4.24** Visualisasi kontur intensitas turbulensi model *conical diffuser*  $AR = 2$ :

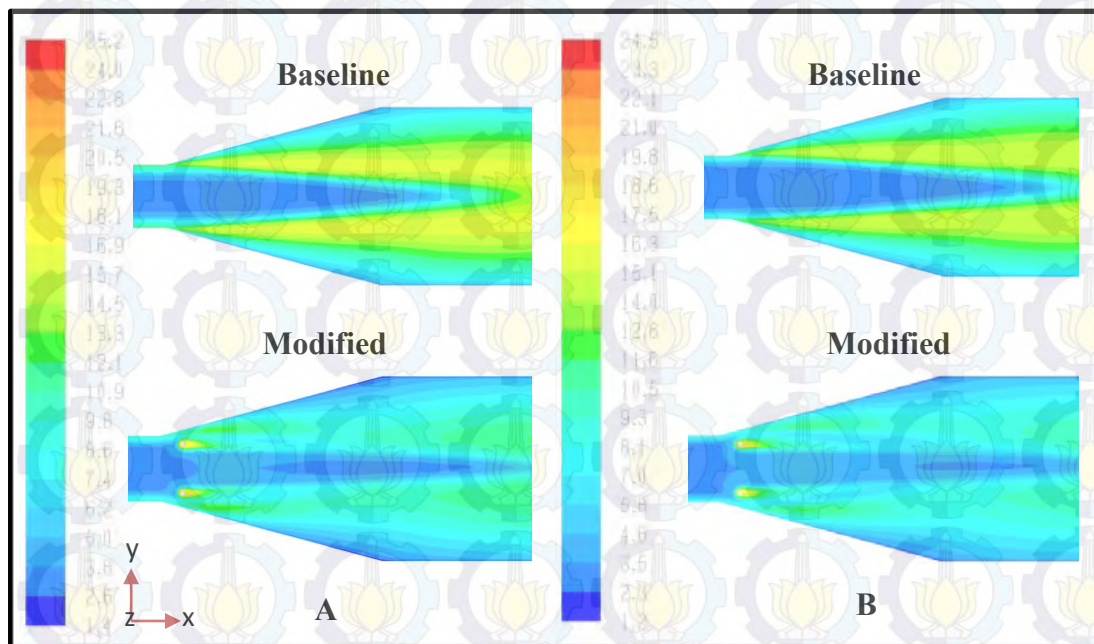
(a)  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$  dan (b)  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$  (mapping dengan *turbulent intensity* dalam %)



**Gambar 4.25** Visualisasi kontur intensitas turbulensi model *conical diffuser*  $AR = 6$ :

(a)  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$  dan (b)  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$  (mapping dengan *turbulent intensity* dalam %)





**Gambar 4.26** Visualisasi kontur intensitas turbulensi model *conical diffuser*  $AR = 8$ :  
(a)  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan (b)  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$  (*mapping* dengan *turbulent intensity* dalam %)

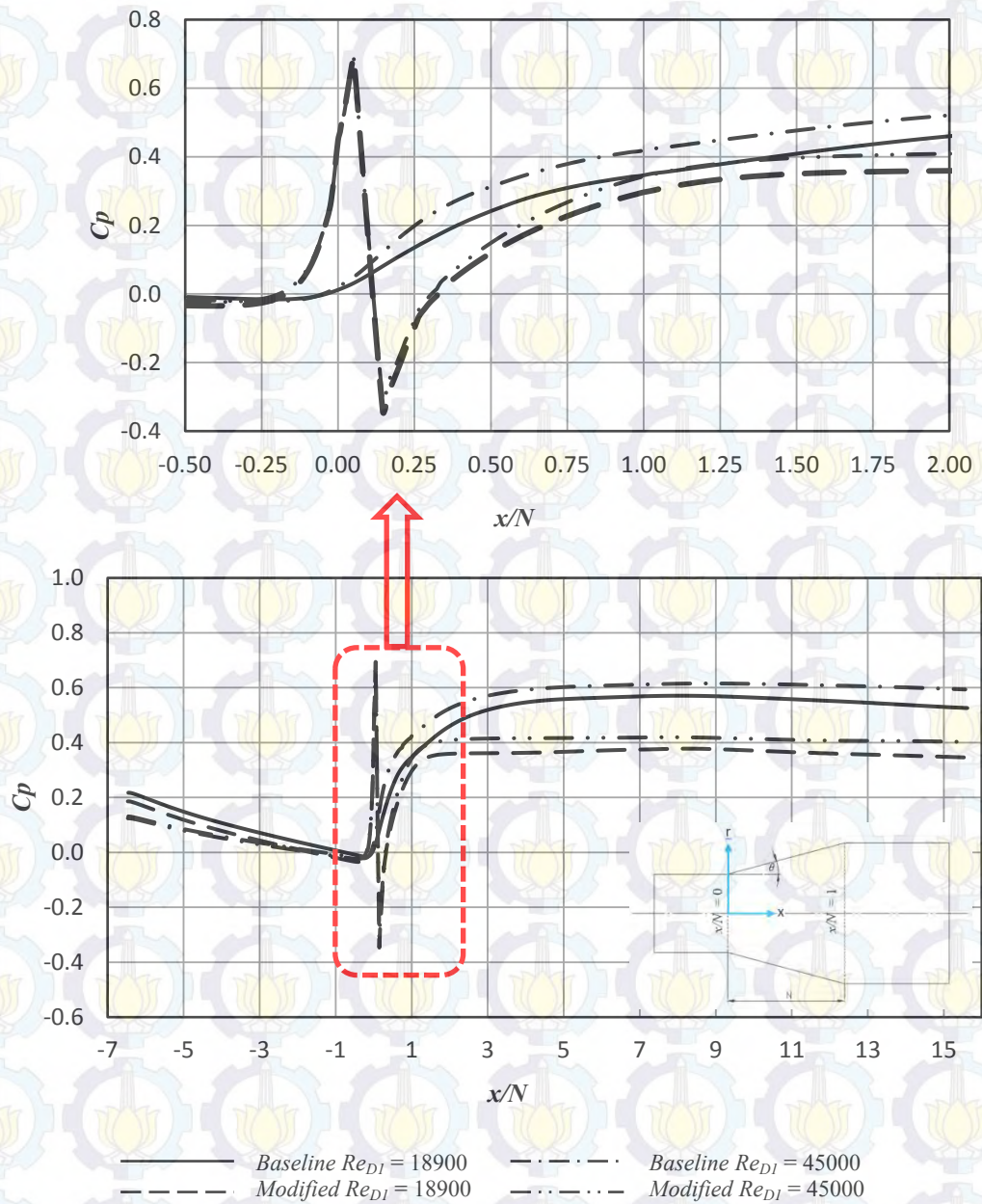
#### 4.3 Distribusi *Pressure Coefficient* ( $C_p$ )

*Pressure coefficient* ( $C_p$ ) merupakan salah satu bilangan tak berdimensi yang dapat mempresentasikan kinerja suatu *diffuser* khususnya nilai *pressure recovery coefficient* ( $C_{pr}$ ). Performa *diffuser* dipengaruhi oleh konstruksi *diffuser*, salah satunya adalah *area ratio* ( $AR$ ). Dimana dengan adanya pengaruh *area ratio*, *diffuser* dapat berfungsi sebagai alat pengkonversi energi kinetik menjadi energi potensial.

Gambar 4.27, 4.28, dan 4.29 masing-masing menunjukkan perbandingan distribusi *wall pressure coefficient* ( $C_p$ ), *conical diffuser*  $AR = 2, 6$ , dan  $8$  untuk  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$  tanpa dan dengan penambahan *vortex generator*. Sedangkan gambar 4.30, 4.31, dan 4.32 masing-masing menunjukkan perbandingan distribusi *pressure coefficient* ( $C_p$ ), *conical diffuser*  $AR = 2, 6$ , dan  $8$  pada *centerline* untuk  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$  tanpa dan dengan penambahan *vortex generator*. Dari ketiga gambar tersebut menunjukkan bahwa distribusi  $C_p$  pada *wall* dan *centerline*, memiliki tren grafik yang relatif sama

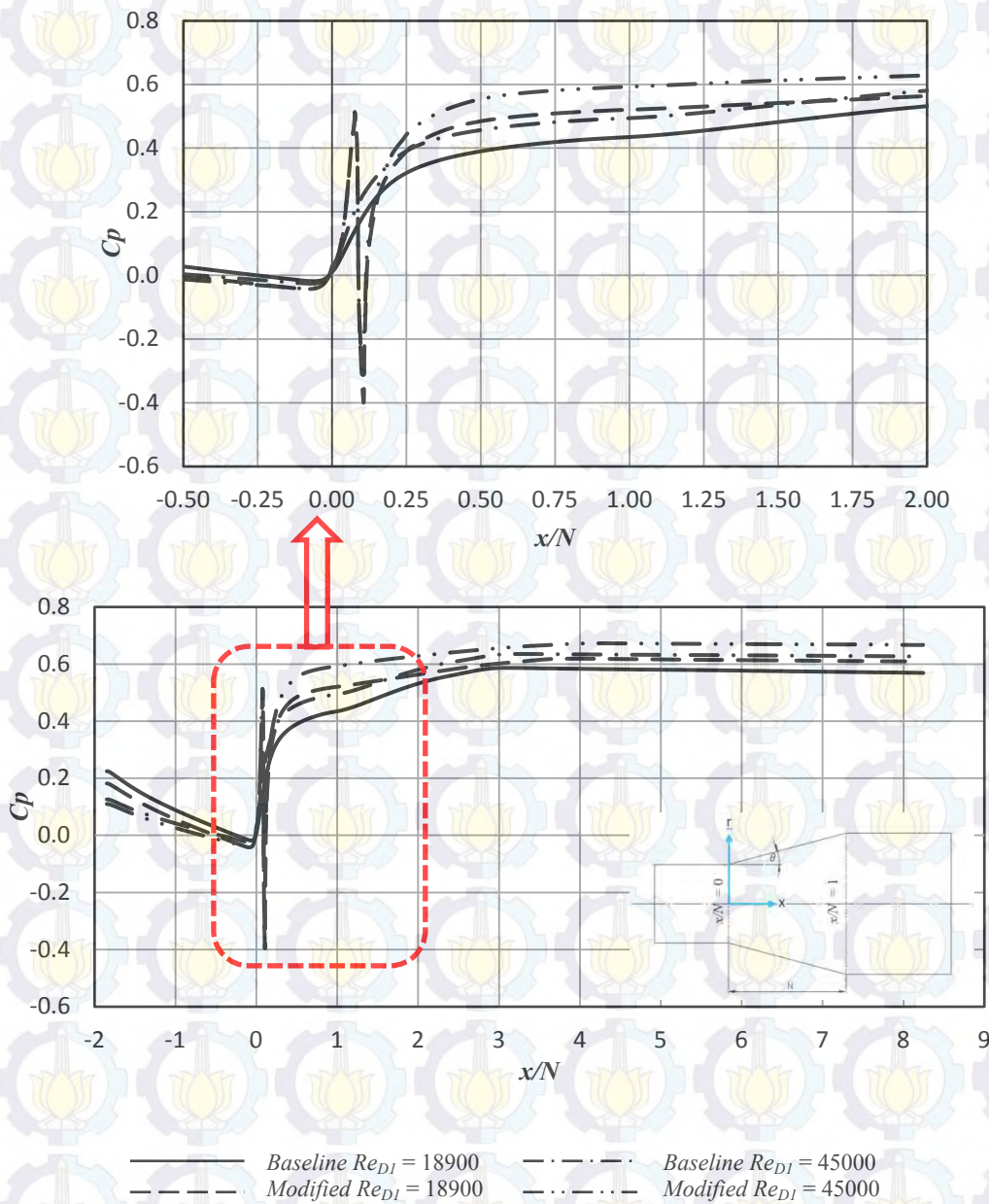


untuk model *baseline* dan berbeda untuk model *modified*. Perbedaan ini dikarenakan adanya penambahan *vortex generator* didalam *conical diffuser*.



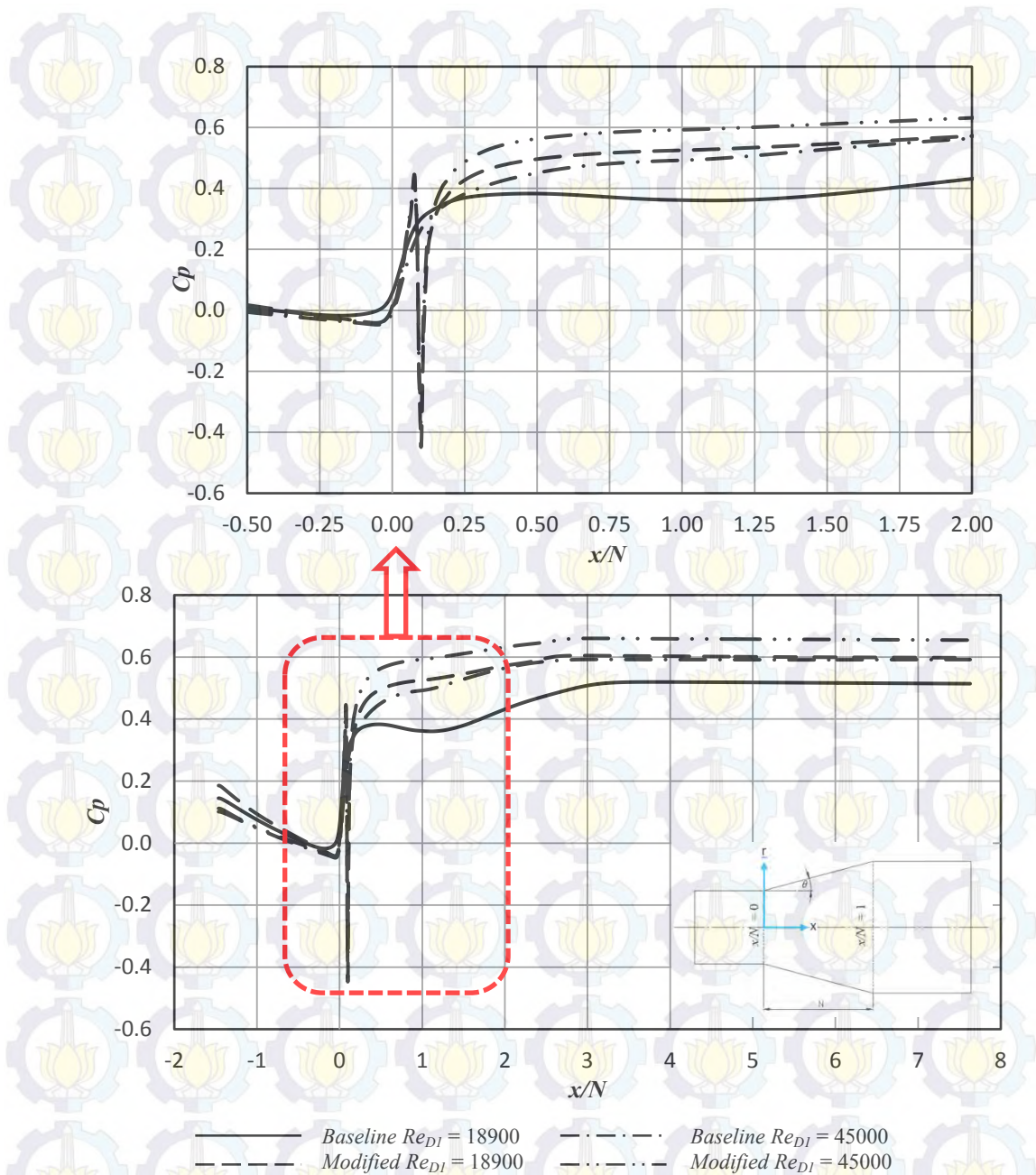
**Gambar 4.27** Distribusi wall pressure coefficient ( $C_p$ ), model conical diffuser,  $AR = 2$ , tanpa (baseline) dan dengan penambahan vortex generator (modified)





**Gambar 4.28** Distribusi wall pressure coefficient ( $C_p$ ), model conical diffuser,  $AR = 6$ , tanpa (baseline) dan dengan penambahan vortex generator (modified)





**Gambar 4.29** Distribusi wall *pressure coefficient* ( $C_p$ ), model *conical diffuser*,  $AR = 8$ , tanpa (*baseline*) dan dengan penambahan *vortex generator* (*modified*)

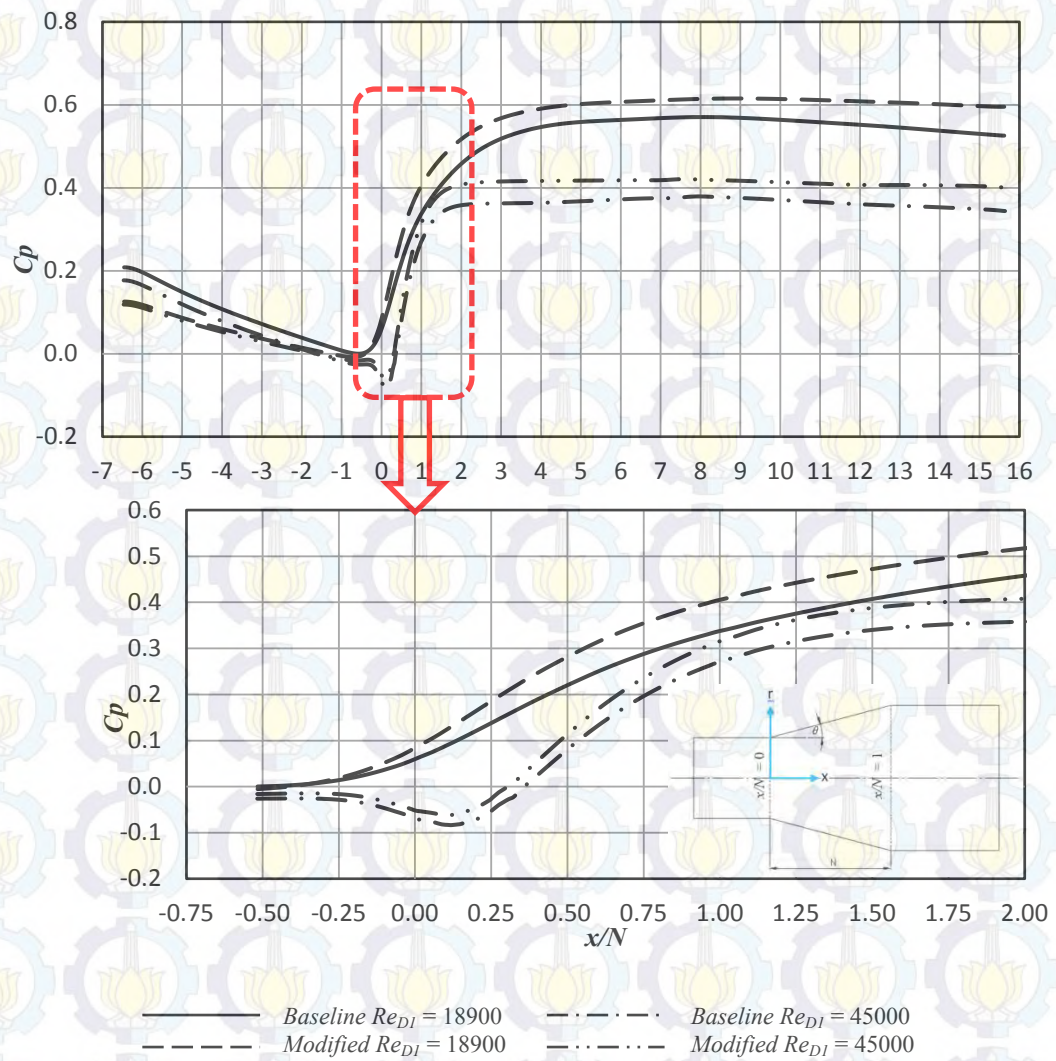
Saat aliran akan memasuki inlet diffuser ( $x/N = 0$ ), distribusi  $C_p$  model *baseline* maupun model *modified* untuk  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  maupun  $Re_{D1} = 4.5 \times 10^4$  mengalami penurunan sangat drastis hingga mencapai harga  $C_p$  minimum. Fenomena ini dipengaruhi oleh adanya penebalan *boundary layer* yang menyebabkan kenaikan nilai  $U_{maks}$  seiring perubahan jarak sehingga pada rentang



tersebut tidak lagi menjadi daerah *zero pressure gradient* namun bersifat *favorable pressure gradient (FPG)*. Pengaruh *FPG* (gradient tekanan yang bernilai negatif) inilah yang menyebabkan penurunan nilai *Cp*. *Conical diffuser*  $AR = 2, 6$  dan  $8$  memiliki distribusi nilai *Cp* yang berbeda pada saat masuk *diverging wall*. Terlihat mulai  $x/N = 0$  pengaruh *area ratio* dan penambahan *vortex generator* memberikan pengaruh yang berbeda pada distribusi kenaikan nilai *Cp*. Setelah  $x/N = 0$ , distribusi *Cp* terus naik sebelum dan setelah melewati *vortex generator* sampai *downstream channel*. Penambahan *vortex generator* pada  $AR = 2$  memberikan pengaruh negatif terhadap performa *conical diffuser* yaitu menurunnya performa yang ditunjukkan oleh nilai *Cp* model *modified* pada sisi *downstream channel* yang lebih kecil dibandingkan model *baseline*. Namun penambahan *vortex generator* pada *area ratio* = 6 dan 8 menunjukkan adanya peningkatan performa daripada *conical diffuser* tanpa *vortex generator*.

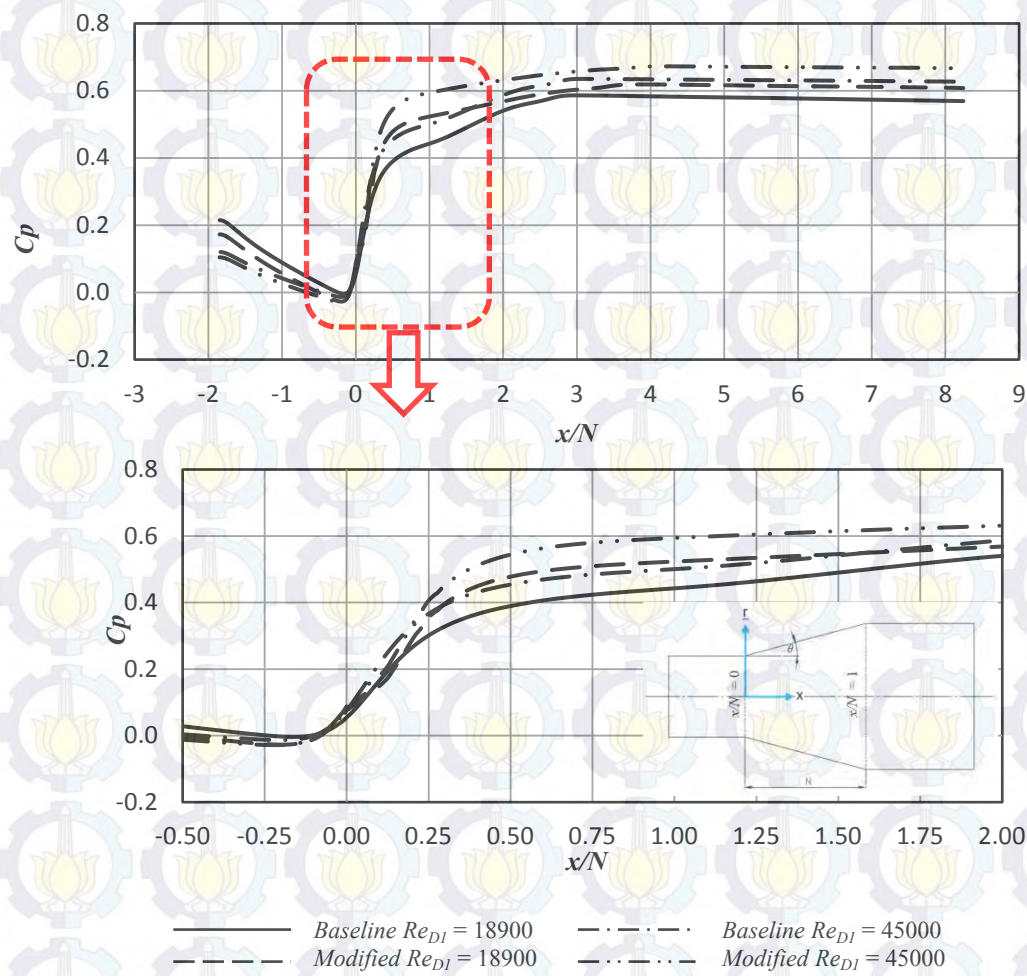
Nilai *Cp* pada *wall* bernilai fluktuatif sebelum dan setelah melewati *vortex generator* ( $x/N = 0.1$ ) yang diletakkan dekat dengan dinding. Kenaikan nilai *Cp* yang berfluktuatif disebabkan berkurangnya luasan efektif dari *cross section* sehingga terbentuk *vortex* guna meningkatkan momentum aliran pada dinding. Lain halnya dengan posisi *centerline*, dengan adanya *vortex generator* pengaruh trend grafik distribusi nilai *Cp* model *modified* relatif sama dengan model *baseline*. Hal ini dikarenakan pada posisi *centerline* pengaruh *vortex generator* tidak terlalu besar.





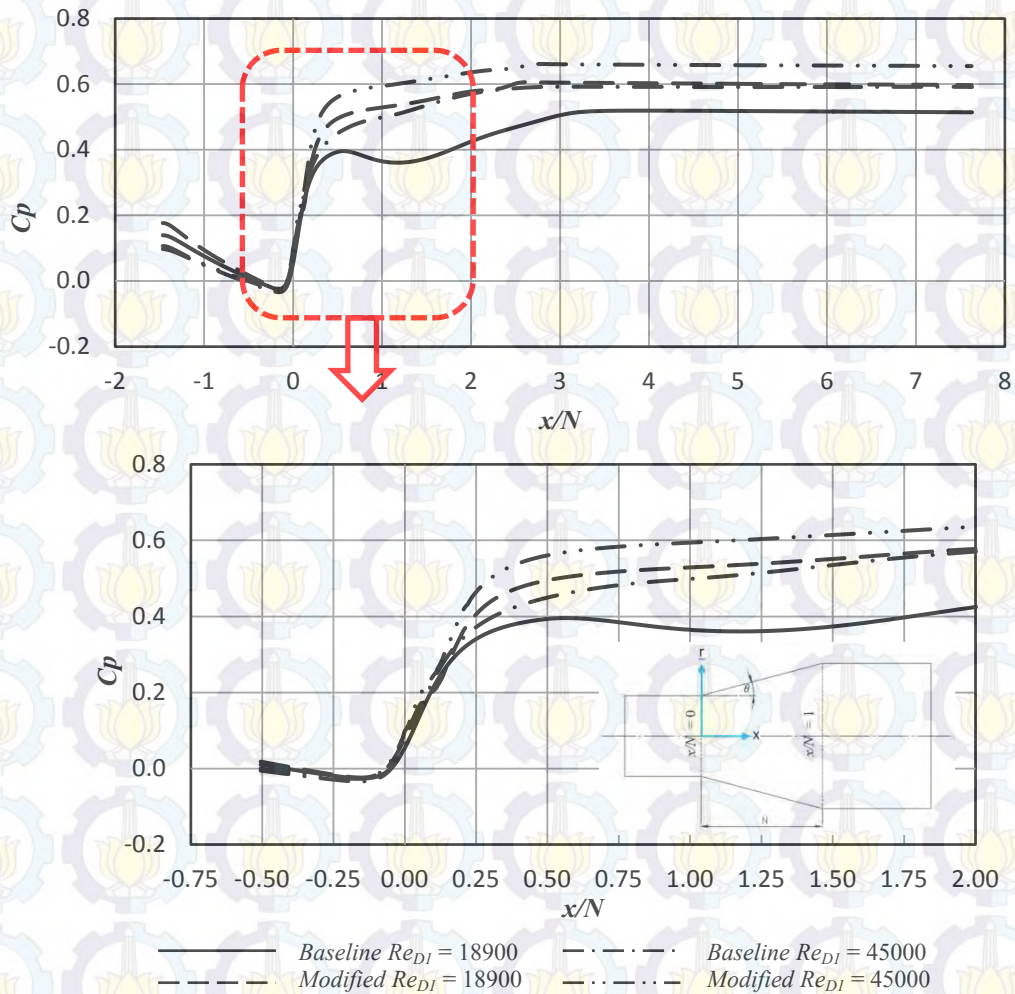
**Gambar 4.30** Distribusi *pressure coefficient* ( $C_p$ ), model *conical diffuser*,  $AR = 2$ , tanpa (*baseline*) dan dengan penambahan *vortex generator* (*modified*) pada *centerline*





**Gambar 4.31** Distribusi *pressure coefficient* ( $C_p$ ), model *conical diffuser*,  $AR = 6$ , tanpa (baseline) dan dengan penambahan *vortex generator* (*modified*) pada *centerline*





**Gambar 4.32** Distribusi *pressure coefficient* ( $C_p$ ), model *conical diffuser*,  $AR = 8$ , tanpa (*baseline*) dan dengan penambahan *vortex generator* (*modified*) pada *centerline*

Perbandingan distribusi nilai koefisien tekanan ( $C_p$ ) *diffuser*  $AR = 2, 6$  dan  $8$  tanpa dan dengan *vortex generator* pada *wall* maupun *centerline* menunjukkan fenomena yang relatif serupa (gambar 4.30, 4.31, dan 4.32). Terdapat sedikit perbedaan pada posisi setelah inlet *diffuser*, yaitu  $0 < x/N < 0.25$  dan  $x/N = 1$ . Pada posisi  $0 < x/N < 0.25$  fluktuasi nilai  $C_p$  pada *conical diffuser*  $AR = 2$  sebelum dan sesudah melewati *vortex generator* lebih tinggi dibandingkan  $AR = 6$  dan  $8$ . *Vortex* yang terbentuk oleh adanya *vortex generator* menyebabkan intensitas turbulensi aliran dibelakang *vortex generator* meningkat. Akibat meningkatnya intensitas turbulensi, momentum aliran pada *wall* pun juga mengalami peningkatan. Momentum aliran yang lebih tinggi ini diharapkan mampu untuk



melawan *adverse pressure gradient* dan tegangan geser pada *wall diffuser*, sehingga separasi yang terjadi dapat tertunda. Lain halnya pada  $x/N = 2$ , nilai  $C_p$  berbeda untuk model *conical diffuser* dengan variasi *area ratio* karena dipengaruhi oleh perubahan *panjang diffuser* ( $N$ ) dan diameter *outlet diffuser* ( $D_2$ ) yang berbanding lurus dengan pertambahan *area ratio* pada *conical diffuser* ( $2\theta_1$ ) =  $30^\circ$ .

Untuk mengetahui performa dari suatu *conical diffuser*, digunakan nilai  $C_{pr}$  yang dihasilkan. Perbandingan nilai  $C_{pr}$  dan  $C_{p_{maks}}$  untuk kedua model *conical diffuser* ini ditunjukkan pada tabel 4.2.

**Tabel 4.2.** Perbandingan nilai  $C_{pr}$  dan  $C_{p_{maks}}$  untuk model *baseline* dan *modified conical diffuser* ( $2\theta_1$ ) =  $30^\circ$

<i>Conical diffuser</i>	$Re_{D1}$ ( $10^4$ )	Model <i>Baseline</i>		Model <i>Modified</i>	
		$C_{pr}$	$C_{p_{maks}}$	$C_{pr}$	$C_{p_{maks}}$
$AR = 2$	1.89	0.380	0.346	0.280	0.694
	4.5	0.409	0.418	0.377	0.687
$AR = 6$	1.89	0.428	0.435	0.513	0.525
	4.5	0.497	0.494	0.595	0.593
$AR = 8$	1.89	0.486	0.383	0.562	0.525
	4.5	0.495	0.492	0.630	0.592

Pada tabel 4.2 dapat dilihat bahwa nilai  $C_{pr}$  dan  $C_{p_{maks}}$  meningkat setelah model *conical diffuser* dimodifikasi dengan pemasangan *vortex generator* dan variasi bilangan *Reynolds* adalah model dengan  $AR = 6$  dan  $8$ . Untuk  $AR = 6$ , nilai  $C_{pr}$  meningkat sebesar 6.04% dan 16.5% untuk  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan  $4.50 \times 10^4$ , sedangkan  $C_{p_{maks}}$  meningkat sebesar 17.1% dan 16.7% untuk  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan  $4.50 \times 10^4$ . Untuk  $AR = 8$ , nilai  $C_{pr}$  meningkat sebesar 13.5% dan 21.4% untuk  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan  $4.50 \times 10^4$ , sedangkan  $C_{p_{maks}}$  meningkat sebesar 27.0% dan 16.9% untuk  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan  $4.5 \times 10^4$ . Sedangkan untuk  $AR = 2$ , nilai  $C_{pr}$  mengalami penurunan sebesar 26.3% dan 7.8% untuk  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan  $4.50 \times 10^4$ . Hal ini disebabkan karena pada daerah *diverging*  $AR = 2$ ,

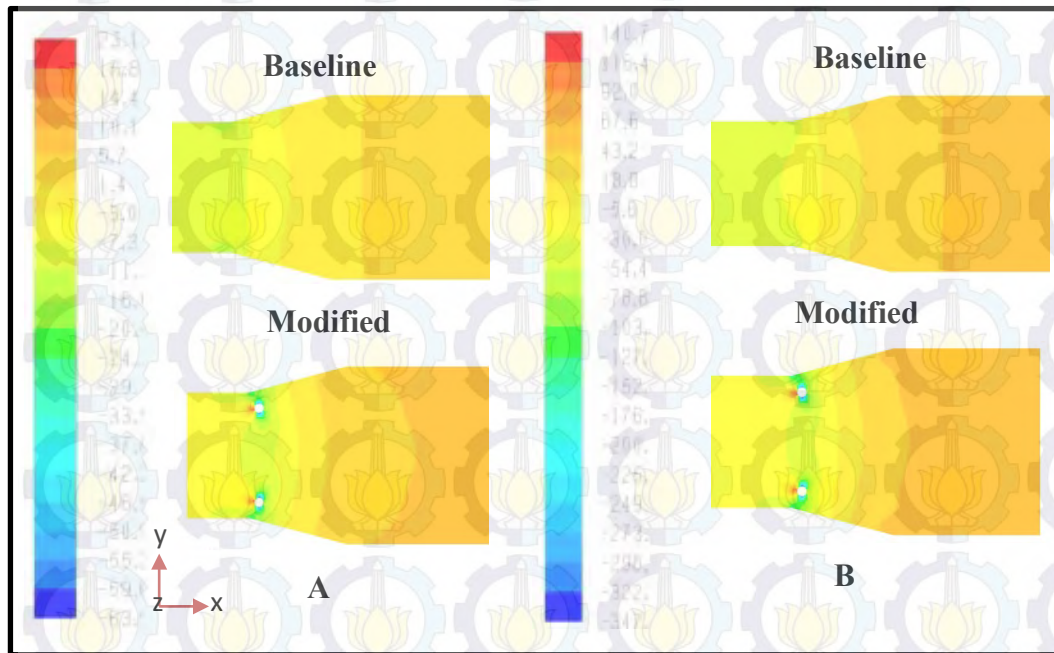


memiliki panjang *diffuser* ( $N$ ) yang paling pendek membuat proses pemulihan aliran lebih lama sehingga nilai  $C_p$  yang dihasilkan pada *outlet diffuser* tidak maksimal. Sebaliknya nilai  $C_{p_{maks}}$  untuk *area ratio* = 2 mengalami peningkatan sebesar 50.1% dan 39.2%.

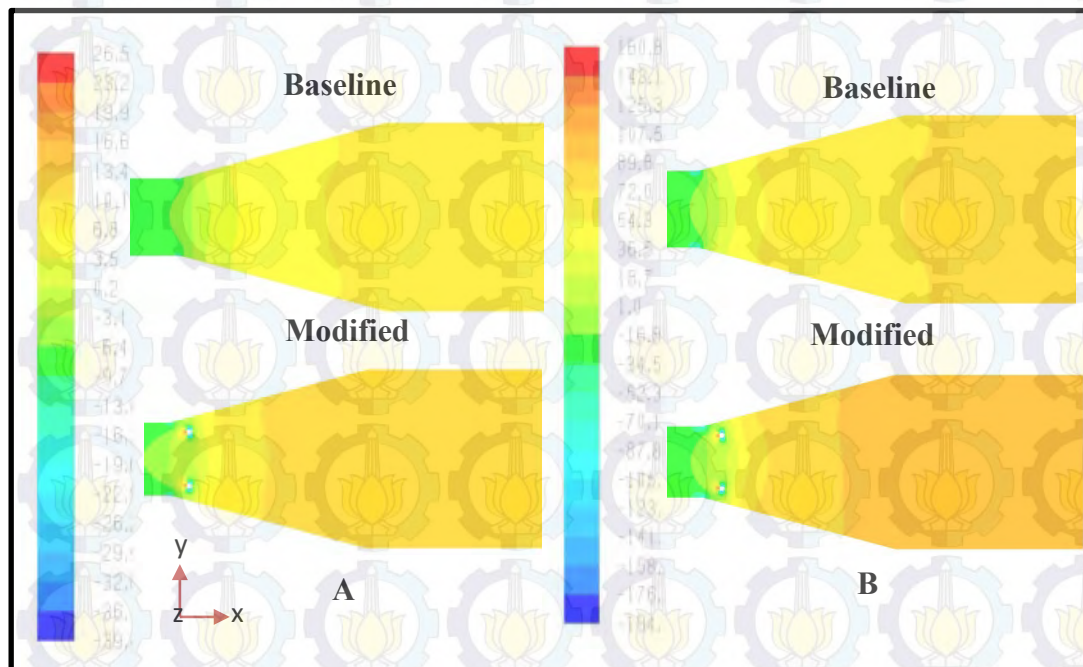
Visualisasi kontur tekanan statis model *conical diffuser* ( $2\theta$ ) =  $30^\circ$ , *area ratio* = 2 untuk  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$  dan  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$  tanpa dan dengan VG ditunjukkan pada gambar 4.33. Sedangkan visualisasi kontur tekanan statis model *conical diffuser*,  $AR = 6$  dan 8 tanpa dan dengan VG masing-masing ditunjukkan pada gambar 4.34 dan 4.35. Visualisasi kontur tekanan statis dapat memberikan informasi mengenai perubahan nilai  $C_p$  dari *upstream* sampai *downstream channel* yang ditunjukkan oleh gradasi warna yang terbentuk. Kontur tekanan statis pada *inlet diffuser* sisi *diverging* menunjukkan peningkatan nilai  $C_p$  secara gradual. Nilai  $C_{p_{maks}}$  berbanding lurus dengan peningkatan konfigurasi *area ratio* pada model *conical diffuser*. Semakin besar  $AR$  maka semakin besar pula nilai  $C_{p_{maks}}$  yang terbentuk. Perubahan tekanan statis pada model *conical diffuser* dengan *vortex generator* untuk  $AR = 6$  dan 8, memiliki nilai  $C_p$  lebih tinggi daripada model *baseline* (tanpa *vortex generator*).

Faktor yang mempengaruhi nilai  $C_p$  untuk model *modified* yaitu posisi *vortex generator* yang sesuai dengan konfigurasi model sehingga dapat meningkatkan momentum aliran pada dinding *diffuser*. Hal ini bertujuan agar aliran dapat mampu melawan *adverse pressure gradient* dan efek gesekan. Sedangkan nilai  $C_p$  pada model *conical diffuser* dengan  $AR = 2$  dengan  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$  untuk daerah dekat *vortex generator* menunjukkan tidak adanya peningkatan dibandingkan *model baseline*.



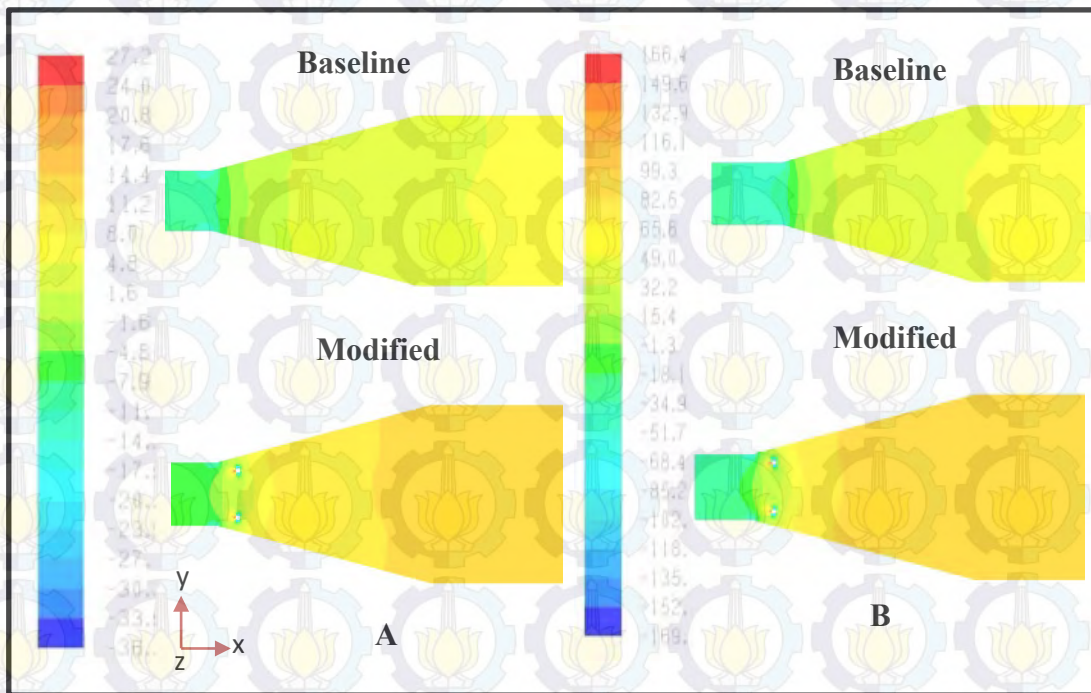


**Gambar 4.33** Visualisasi kontur tekanan statis model *conical diffuser*  $AR = 2$ : (a)  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan (b)  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$  (dalam  $Pa_{(gauge)}$ )



**Gambar 4.34** Visualisasi kontur tekanan statis model *conical diffuser*  $AR = 6$ : (a)  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan (b)  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$  (dalam  $Pa_{(gauge)}$ )





**Gambar 4.35** Visualisasi kontur tekanan statis model *conical diffuser*  $AR = 8$ : (a)  $Re_{D1} = 1.89 \times 10^4$  dan (b)  $Re_{D1} = 4.50 \times 10^4$  (dalam  $Pa_{(gauge)}$ )

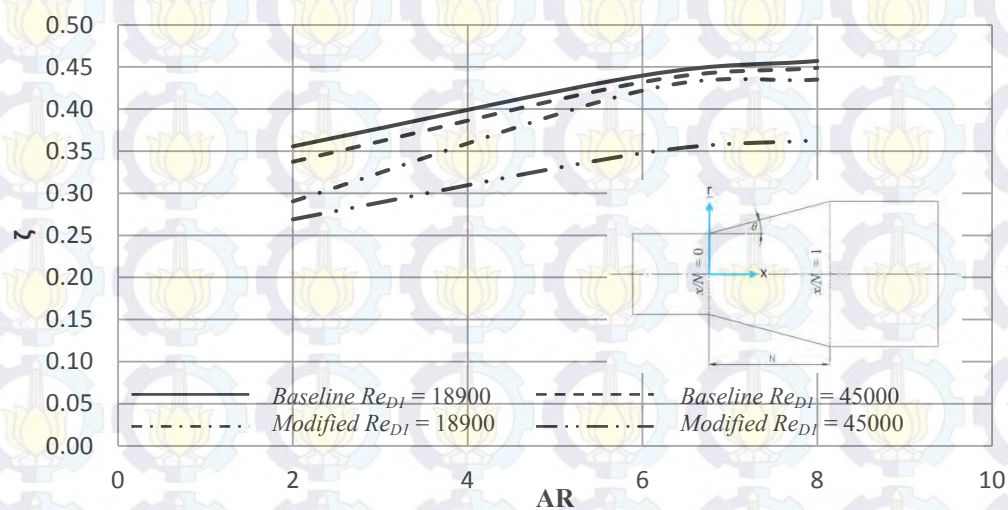
#### 4.4 Distribusi *Total Pressure Loss Coefficient* ( $\zeta$ )

Koefisien kerugian tekanan total (*total pressure loss coefficient*) adalah perbandingan antara selisih tekanan total dibandingkan tekanan dinamis. Koefisien kerugian tekanan total digunakan untuk mengilustrasikan separasi aliran 3D dan menunjukkan seberapa besar kerugian energi yang ditimbulkan oleh efek gesekan dan aliran sekunder. Dalam kasus *internal flow* yaitu aliran yang mengalir dalam *conical diffuser*, aliran sekunder yang terjadi sangat mempengaruhi nilai koefisien kerugian tekanan total. Dimana hubungan aliran sekunder sebanding dengan besarnya nilai koefisien kerugian tekanan total. Sebaliknya semakin besar aliran sekunder yang terjadi maka semakin besar juga koefisien kerugian tekanan total, begitu pula sebaliknya.

Keefektifan pemasangan *vortex generator* pada model *conical diffuser* tidak hanya dipengaruhi oleh salah satu parameter dari geometri *conical diffuser* yaitu *area ratio* tetapi juga dipengaruhi oleh besarnya bilangan *Reynolds*.



Semakin besar *area ratio*, kerugian energi yang terjadi semakin meningkat. Sedangkan semakin besar bilangan *Reynolds*, kerugian energi yang terjadi semakin kecil. Dari gambar 4.36 ditunjukkan bahwa *vortex generator* lebih efektif dipasang pada *area ratio* = 2 untuk aliran dengan  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$  dan  $4.50 \times 10^4$ . Namun *model conical diffuser* untuk *area ratio* = 6 dan 8, pemasangan *vortex generator* lebih efektif untuk aliran dengan  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$ . Hal ini disebabkan karena dengan adanya *vortex generator* besarnya kemampuan mereduksi kerugian energi yang ditimbulkan oleh aliran sekunder.



**Gambar 4.36** Total pressure loss coefficient pada model *conical diffuser* untuk sudut divergensi konstan ( $2\theta$ ) =  $30^\circ$

Besarnya nilai *total pressure loss coefficient* ( $\zeta$ ) dari *model conical diffuser* tanpa dan dengan *vortex generator* pada *outlet diffuser* dengan  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$  dan  $4.50 \times 10^4$  ditunjukkan pada Tabel 4.3. Dari tabel 4.3 dapat dilihat dengan penambahan *vortex generator* dapat mereduksi nilai *total pressure losses coefficient*. Pada  $AR = 6$  dan  $8$  untuk  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$  pereduksian kerugian energi yang terjadi tidak terlalu besar hanya 3.87% dan 4.81% dibandingkan  $AR = 2$  yaitu sebesar 18.54%. Sedangkan untuk  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$  untuk semua variasi *area ratio* menunjukkan hubungan bahwa semakin besar *area ratio* maka pereduksian energi yang terjadi semakin kecil. Masing-masing  $AR$  2, 6, dan 8 tereduksi sebesar 20.20%, 19.67%, dan 18.97%. Jika ditinjau berdasarkan *total pressure loss coefficient*, *model conical diffuser* untuk sudut divergensi ( $2\theta$ ) =  $30^\circ$



dengan penambahan *vortex generator* yang memiliki performa yang baik adalah model dengan *area ratio* = 2.

**Tabel 4.3.** *Total pressure loss coefficient ( $\zeta$ ) pada model conical diffuser tanpa dan dengan vortex generator*

<i>AR</i>	$2\theta$	$Re \times 10^{-4}$	$\zeta$ pada outlet diffuser		Reduksi $\zeta$ (%)
			Tanpa VG	Dengan VG	
2	30°	1.89	0.356	0.290	18.54
		4.50	0.337	0.269	20.20
6	30°	1.89	0.439	0.422	3.87
		4.50	0.432	0.347	19.67
8	30°	1.89	0.457	0.435	4.81
		4.50	0.448	0.363	18.97

#### 4.5 Loss Coefficient (*k*)

Suatu bilangan tak berdimensi yang berkaitan erat dengan geometri dan performa *diffuser* adalah *loss coefficient* (*k*). Semakin baik performa yang dimiliki sebuah *diffuser* maka semakin kecil nilai *loss coefficient*-nya. Nilai *loss coefficient* dapat dijadikan acuan untuk menunjukkan geometri yang efisien dan performa *diffuser* yang baik. Model dengan penambahan *vortex generator* konfigurasi *area ratio* 2 menunjukkan adanya peningkatan nilai “*k*” namun tidak ada dampak positif setelah ditambahkan *vortex generator*. Definisi dari peningkatan *loss coefficient* menunjukkan bahwa tingkat kerugian yang tinggi, dimana dapat berakibat menurunnya performa dari suatu *diffuser*. Nilai *loss coefficient* yang rendah menunjukkan tingkat kerugian yang rendah, dimana hal ini mengindikasikan performa *diffuser* yang baik. Nilai *loss coefficient* dipengaruhi oleh nilai *pressure coefficient* dan *area ratio*, dimana jika suatu *diffuser* dengan *area ratio* yang semakin besar dan nilai *pressure coefficient* yang besar maka nilai *loss coefficient* minimum dan begitu pula sebaliknya.

Menurut **Idelchik** [11], nilai *loss coefficient* yang optimal untuk *conical diffuser* adalah yang memiliki sudut divergensi  $10^\circ \leq (2\theta) \leq 14^\circ$  dengan *area ratio* optimal  $2 \leq AR \leq 10$  (tabel 2.1). Model *conical diffuser* dengan sudut divergensi konstan, variasi bilangan *Reynolds*, dan variasi *area ratio* memiliki nilai *loss coefficient* tercantum dalam tabel 4.4. Berdasarkan tabel 4.4, nilai *loss coefficient*



memiliki tren data, dimana semakin besar *area ratio*-nya pada sudut divergensi konstan ( $2\theta = 30^\circ$ ) menunjukkan semakin besar nilai *loss coefficient*-nya. Sedangkan semakin besar bilangan *Reynolds* maka semakin kecil nilai *loss coefficient*-nya. Tabel 4.4 menunjukkan adanya kesesuaian tren data nilai  $k$  hasil penelitian numerik dengan variasi *area ratio* dan variasi bilangan *Reynolds*.

**Tabel 4.4.** *Loss coefficient* ( $k$ ) pada model *conical diffuser* dengan sudut divergensi konstan ( $2\theta = 30^\circ$ )

$AR$	$2\theta$	$Re \times 10^{-4}$		$k$ (pers. 2.13)		
				Tanpa VG	Tanpa VG <sup>*)</sup>	Dengan VG
2	$30^\circ$	1.89	$5.0^*)$	0.408	0.315	0.456
		4.50		0.375		0.406
6	$30^\circ$	1.89	$5.0^*)$	0.534	0.482	0.451
		4.50		0.475		0.379
8	$30^\circ$	1.89	$5.0^*)$	0.531	0.534	0.459
		4.50		0.520		0.392

<sup>\*)</sup> *Loss coefficient* ( $k$ ) pada model *conical diffuser* menurut **Idelchik** [11]

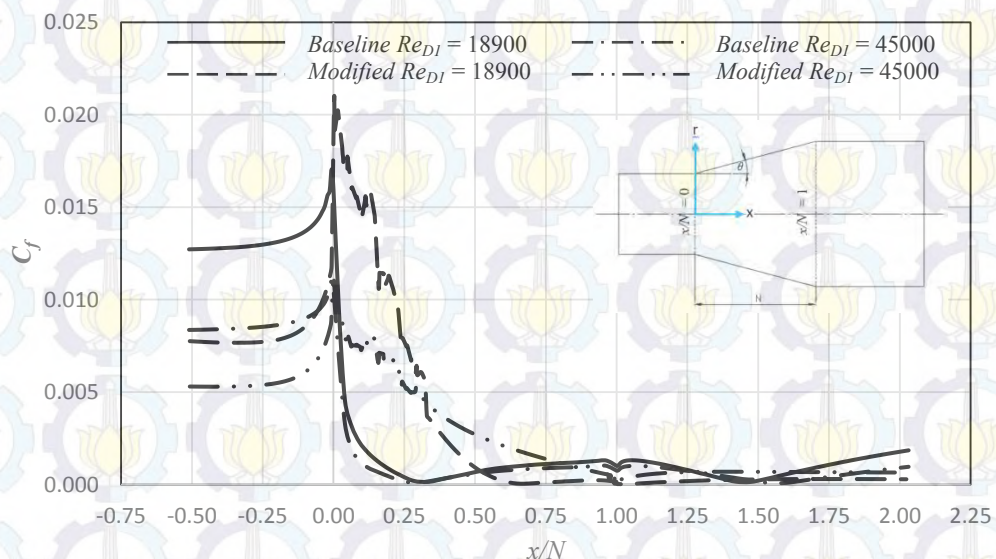
#### 4.6 Skin Friction Coefficient ( $C_f$ )

Besarnya *skin friction coefficient* ( $C_f$ ) erat kaitannya dengan besarnya tegangan geser dinding ( $\tau_w$ ). Gambar 4.37, 4.38, dan 4.39 masing-masing menunjukkan distribusi  $C_f$  pada wall model *conical diffuser* dengan *area ratio* ( $AR$ ) = 2, 6, dan 8 tanpa dan dengan penambahan *vortex generator*. Dari gambar tersebut terlihat adanya perbedaan nilai  $C_f$  untuk model *baseline* (tanpa *vortex generator*) dan model *modified* (dengan *vortex generator*). Pada *upstream channel* ( $x/N = -0.5$  hingga  $x/N = 0$ ), untuk model *baseline* maupun *modified* variasi *area ratio* dan bilangan *Reynolds* memiliki tren grafik yang sama yaitu bernilai relatif konstan dan sesaat akan memasuki *diverging wall* yaitu *inlet diffuser* ( $x/N = 0$ ) harga *skin friction coefficient* ( $C_f$ ) mengalami peningkatan. Hal ini terjadi dikarenakan perubahan penampang dari *straight wall* menjadi *diverging wall* dengan perubahan dinding penampang yang diskontinuitas.

Pada gambar 4.37 mengilustrasikan model *conical diffuser* dengan  $AR = 2$  tanpa penambahan *vortex generator* (model *baseline*), terjadi penurunan drastis nilai  $C_f$  dari *cross section*  $x/N = 0$  hingga  $x/N = 0.35$  untuk  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$  dan



untuk  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$  terjadi pada *cross section*  $x/N = 0$  hingga  $x/N = 0.4$ . Fenomena berbeda terjadi pada model *modified*, nilai  $C_f$  tidak mengalami penurunan drastis seperti model *baseline*, nilai  $C_f$  pada model *modified* berfluktuatif dari *cross section*  $x/N = 0$  hingga  $x/N = 0.308$  untuk  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$ . Hal ini karena ketika memasuki *diverging area* dan melewati *circular ring vortex generator* yang berada dekat dengan dinding, aliran akan terhambat oleh 2 jenis, yaitu *APG* utama yang terbentuk karena konstruksi *conical diffuser* yang menyebabkan nilai  $C_f$  mengalami penurunan dan *APG* lokal serta *FPG* yang terbentuk saat aliran melewati sisi *upstream circular ring vortex generator* yang menyebabkan nilai  $C_f$  berfluktuatif.



**Gambar 4.37** Perbandingan distribusi *skin friction coefficient* ( $C_f$ ) model *conical diffuser*,  $AR = 2$ , tanpa (*baseline*) dan dengan penambahan *vortex generator* (*modified*)

*Skin friction coefficient* ( $C_f$ ) pada *cross section* model *baseline* tersebut dipengaruhi oleh tekanan stagnasi, dimana tekanan stagnasi yang paling dekat dengan dinding akan mengalami penurunan harga searah dengan arah aliran didalam *diffuser*. Dengan harga tekanan stagnasi yang semakin kecil dan tekanan statis yang semakin besar maka harga selisih keduanya ( $\Delta p$ ) akan semakin menurun, dengan harga  $\Delta p$  yang semakin menurun akan menyebabkan harga tegangan geser ( $\tau_w$ ) juga akan mengalami penurunan. Hubungan antara nilai tegangan geser dengan *skin friction coefficient* adalah sebanding, dimana



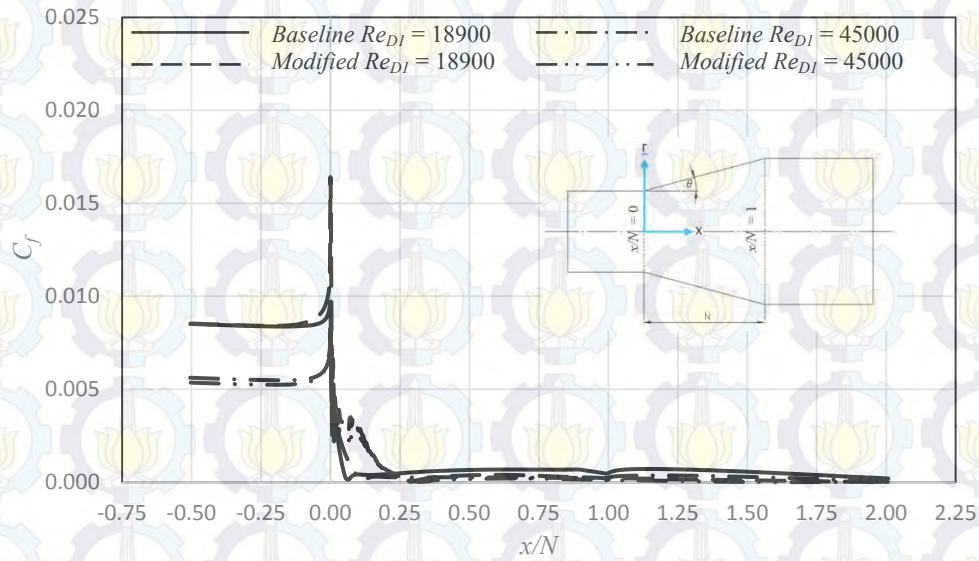
penurunan tegangan geser akan mengakibatkan menurunnya nilai *skin friction coefficient*.

Konstruksi *diffuser* (*cross section*  $x/N = 0$  hingga  $x/N = 1$ ) identik dengan perubahan penampang yang semakin besar sehingga aliran yang mengalir didalamnya akan memperoleh pengaruh *APG* yang semakin besar. Nilai  $C_f$  nol mengindikasikan terjadinya separasi aliran, dengan pengaruh *APG* dan gaya gesek maka aliran pada sisi *diverging wall* akan kembali mengalami penebalan *boundary layer* dan akibatnya aliran didekat *diverging wall* akan mengalami defisit momentum sehingga gradient kecepatan pada dinding bernilai nol

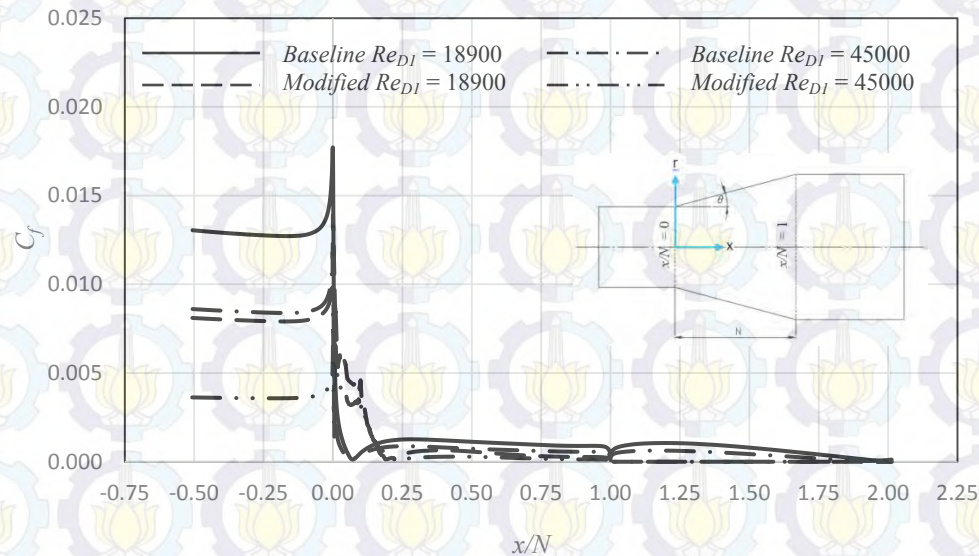
$\left[ \left( \frac{du}{dy} \right)_{y=0} = 0 \right]$  dan terjadi separasi. Fenomena *skin friction coefficient* pada gambar 4.37 memiliki kesesuaian dengan gambar 4.11 bahwa nilai  $C_f = 0$  menunjukkan terjadinya separasi aliran. Model modified dengan  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$  pada *cross section*  $x/N = 0$  hingga  $x/N = 1$  tidak menunjukkan  $C_f$  yang bernilai 0. Hal ini menunjukkan pada model tersebut tidak terjadi separasi didalam *diverging wall*.

Pada *downstream channel* (*cross section*  $x/N = 1$  hingga  $x/N = 2$ ), untuk model *baseline* memiliki kecenderungan terjadinya peningkatan nilai  $C_f$ . Hal ini dikarenakan tidak adanya efek *APG* sehingga momentum aliran kembali pulih dan tegangan geser yang terbentuk juga membesar diiringi dengan meningkatnya nilai  $C_f$ . Namun lain halnya dengan model *modified*, pada *cross section downstream channel* yang ditinjau, nilai  $C_f$  relatif 0 cenderung konstan (menandakan separasi aliran untuk  $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$ ). Hal ini menandakan momentum aliran tidak mampu melawan efek *APG* dan gaya gesek yang terjadi setelah melewati *diverging wall*.





**Gambar 4.38** Perbandingan distribusi *skin friction coefficient* ( $C_f$ ) model *conical diffuser*, *area ratio* = 6, tanpa (*baseline*) dan dengan penambahan *vortex generator* (*modified*)



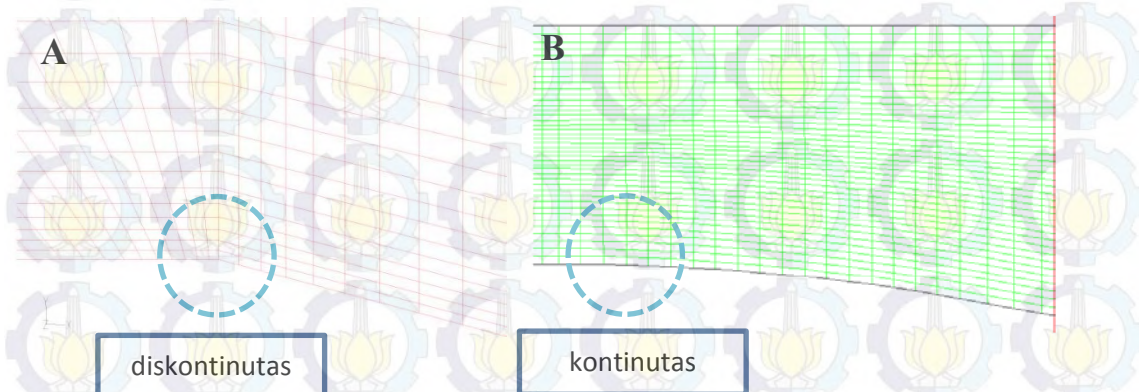
**Gambar 4.39** Perbandingan distribusi *skin friction coefficient* ( $C_f$ ) model *conical diffuser*, *area ratio* = 8, tanpa (*baseline*) dan dengan penambahan *vortex generator* (*modified*)

Gambar 4.38 dan 4.39 menunjukkan perbandingan distribusi  $C_f$  untuk model dengan  $AR = 6$  dan  $8$ . Keseluruhan fenomena yang terjadi relatif sama dengan model *conical diffuser*  $AR = 2$ . Begitu pula gambar 4.38 dan 4.39 memiliki fenomena yang sesuai dengan gambar 4.14 dan 4.15 bahwa nilai  $C_f = 0$  menunjukkan terjadinya separasi aliran. Hubungan antara nilai *skin friction*



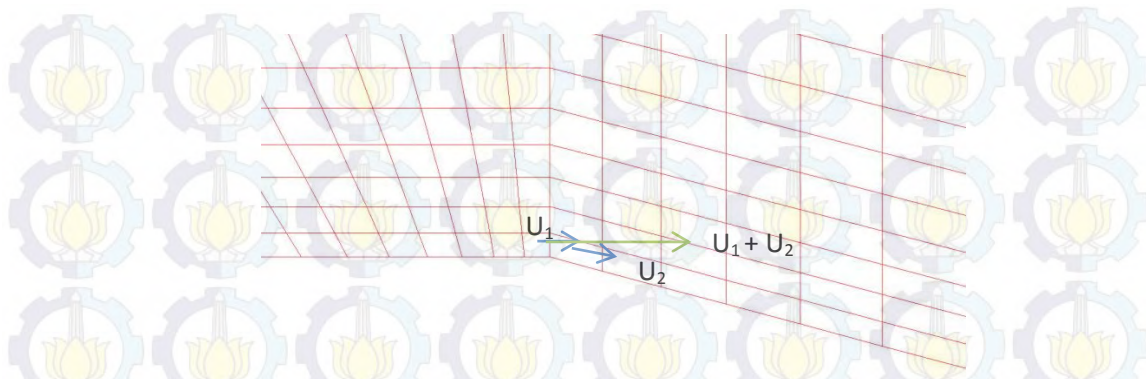
*coefficient* dengan bilangan *Reynolds* adalah berbanding terbalik, dimana semakin besar bilangan *Reynold*-nya maka semakin kecil nilai *skin friction coefficient*-nya. Jika ditinjau berdasarkan konfigurasi model *conical diffuser (AR)*, dimana nilai *skin friction coefficient* semakin kecil seiring semakin panjang *diffuser (N)* yang dilalui. Hubungan antara *area ratio* dan panjang *diffuser* adalah sebanding, dimana semakin besar *area ratio (AR)* maka semakin panjang *diffuser*-nya. Pada ketiga gambar tersebut (gambar 4.37, 4.38, dan 4.39), model *modified* menunjukkan peningkatan nilai  $C_f$  pada daerah diverging. Hal tersebut terjadi karena *vortex generator* dapat meningkatkan momentum aliran di dekat dinding sehingga tegangan geser bertambah diikuti peningkatan  $C_f$ .

Nilai *skin friction coefficient* yang mengalami peningkatan secara signifikan pada saat memasuki *inlet diffuser* ( $x/N = 0$ ) dapat disebabkan oleh tingkat kerapatan cell yang paling dekat dengan dinding. Nilai  $C_f$  erat kaitannya dengan nilai tegangan geser pada dinding ( $\tau_w$ ), dimana tegangan geser pada dinding berkaitan erat dengan *gradient* kecepatan yang nilainya dipengaruhi oleh kerapatan *grid* pada meshing yang terbentuk. Selain hal itu, nilai  $C_f$  yang meningkat pada saat memasuki *inlet diffuser* dikarenakan diskontinuitas meshing *straight wall* menuju daerah diverging (gambar 4.40). Nilai  $C_f$  yang meningkat secara signifikan diduga karena pengambilan data *gradient* kecepatan pada *software Fluent* dihitung bukan pada *center gravity cell* yang terbentuk tetapi pada tepi dua cell yang berdekatan (gambar 4.41).



**Gambar 4.40** Meshing di sekitar *inlet diffuser*: (a) *conical diffuser* dan (b) *flat wall diffuser* [13]





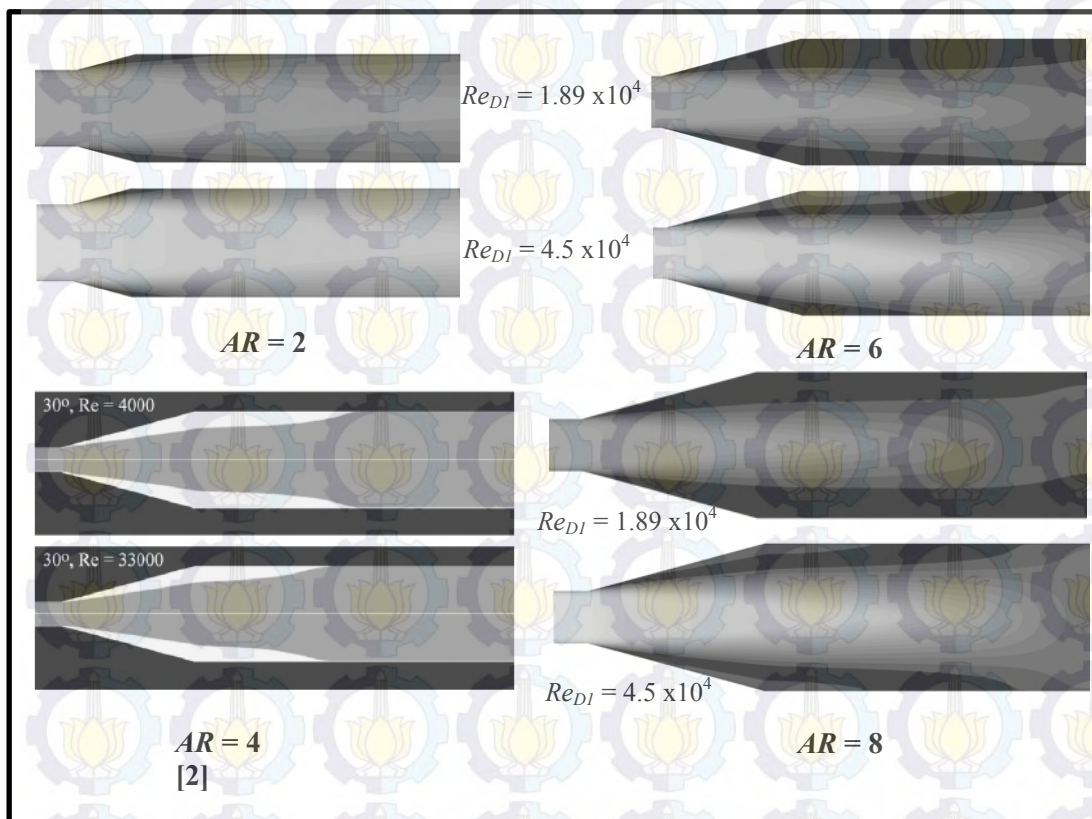
**Gambar 4.41** Posisi *center gravity* pada *cell* sebelum dan sesudah *inlet diffuser* ( $x/N = 0$ )

#### 4.7 Diskusi

Menurut **McDonald dan Fox** [1], tipe *conical diffuser* dapat didesain untuk *pressure recovery coefficient* yang maksimal dibandingkan tipe *flat walled diffuser* karena tipe ini adalah yang paling memungkinkan untuk tidak terjadi separasi. Model *conical diffuser* banyak dijadikan objek penelitian karena fenomena aliran yang sangat menarik dan upaya para peneliti untuk menentukan geometri yang memiliki performa paling efisien. **Sparrow dkk** [2] berpendapat mengenai aliran internal dalam *conical diffuser* tanpa adanya *vortex generator* yaitu semakin tinggi bilangan *Reynolds* yang digunakan maka daerah separasi yang terbentuk akan semakin menyempit dikarenakan semakin tinggi bilangan *Reynolds* maka tingkat turbulensi dari aliran semakin tinggi sehingga akan meningkatkan momentum aliran untuk melawan *APG* dan efek gesekan.

Gambar 4.42 menunjukkan model *conical diffuser* dengan variasi *area ratio* memiliki fenomena yang sama yaitu dengan semakin besarnya bilangan *Reynolds* daerah separasi semakin sempit (penelitian saat ini, ditunjukkan warna gelap dan **Sparrow dkk** [2] ditunjukkan warna terang). Selain ditinjau dari variasi bilangan *Reynolds*, geometri *diffuser* (*area ratio*) juga memiliki peranan yaitu terlihat semakin besar *area ratio* menunjukkan semakin besar daerah separasinya. Hal ini karena melemahnya momentum aliran untuk melawan *APG* dan efek gesekan yang terjadi seiring perubahan panjang *diffuser*.





**Gambar 4.42** Perbandingan area separasi berdasarkan variasi bilangan *Reynolds* pada model *conical diffuser* dengan sudut divergensi  $(2\theta) = 30^\circ$

Upaya untuk meningkatkan performa *conical diffuser* yaitu dengan memodifikasi *conical diffuser* dengan *vortex generator*. *Vortex generator* merupakan suatu alat yang digunakan untuk membangkitkan *vortex*. Pembangkitan *vortex* bertujuan untuk meningkatkan intensitas turbulensi suatu aliran agar dapat meningkatkan momentum aliran. *Vortex* yang terbentuk karena adanya *vortex generator* dapat berbeda-beda, tergantung bentuk dan dimensi dari *vortex generator* yang digunakan. Penelitian saat ini menggunakan *vortex generator* yang telah dikaji oleh Zhang dkk [6]. Pada tabel 4.5 tercantum perbandingan nilai *pressure recovery coefficient* penelitian saat ini dan penelitian dari Zhang dkk [6] yang menjadi referensi dalam penggunaan *circular ring vortex generator*. Namun Zhang dkk [6] menggunakan aliran *subsonic*, metode aliran *unsteady* dan metode turbulensi  $k-\omega$ . Sedangkan penelitian saat ini menggunakan *incompressible flow*, *steady flow* dan metode turbulensi  $k-\epsilon$

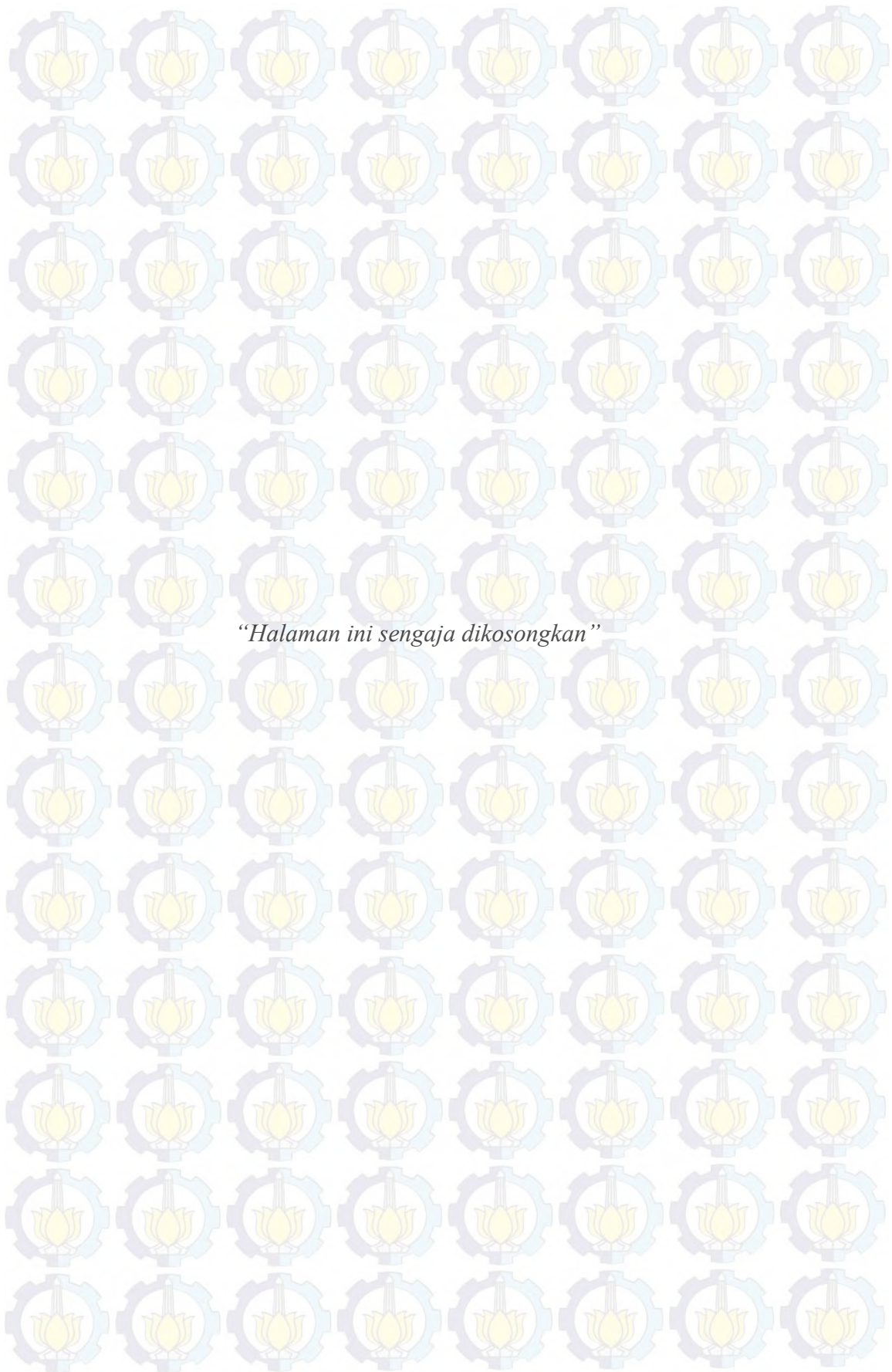


*standard*. Menurut **McDonald dan Fox** [1], fenomena peningkatan performa *diffuser* ( $C_{pr}$ ) pada model *conical diffuser* dengan sudut divergensi konstan ( $2\theta$ ) =  $30^\circ$  menunjukkan tren bahwa nilai *pressure recovery coefficient* semakin besar seiring meningkatnya *area ratio* ( $AR$ ) dan meningkatkannya rasio panjang *diffuser* ( $N/R_I$ ). Hal ini menunjukkan adanya kesesuaian hasil penelitian saat ini dengan penelitian **McDonald dan Fox** [1] dan **Zhang dkk** [6].

**Tabel 4.5.** Perbandingan nilai  $C_{pr}$  dengan penelitian **Zhang dkk** [6]

<i>Conical diffuser</i>	Tipe Aliran	Model <i>Modified</i>
		$C_{pr}$
$AR = 2$ ( $2\theta$ ) = $30^\circ$	$Mach\ number \leq 0.1$ $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$	0.278
	$Mach\ number \leq 0.1$ $Re_{DI} = 4.5 \times 10^4$	0.332
$AR = 3.533$ ( $2\theta$ ) = $29.14^\circ$ ( <b>Zhang dkk</b> )	$Mach\ number = 0.45$	0.4937
$AR = 6$ ( $2\theta$ ) = $30^\circ$	$Mach\ number \leq 0.1$ $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$	0.505
	$Mach\ number \leq 0.1$ $Re_{DI} = 4.5 \times 10^4$	0.586
$AR = 8$ ( $2\theta$ ) = $30^\circ$	$Mach\ number \leq 0.1$ $Re_{DI} = 1.89 \times 10^4$	0.507
	$Mach\ number \leq 0.1$ $Re_{DI} = 4.5 \times 10^4$	0.584







## BAB V PENUTUP

### 5.1. Kesimpulan

Berdasarkan analisa yang telah dilakukan mengenai karakteristik aliran di dalam *conical diffuser* dengan *area ratio* ( $AR$ ) = 2, 6, dan 8 dan sudut divergensi ( $2\theta$ ) konstan yang dimodifikasi dengan *circular ring vortex generator*, didapatkan beberapa kesimpulan diantaranya:

1. Aliran tidak mengalami separasi pada model *conical diffuser* modifikasi dengan *area ratio* ( $AR$ ) = 2 untuk  $Re_{DI} = 4.50 \times 10^4$  karena panjang *diffuser* pada model tersebut relatif pendek serta ditinjau dengan besarnya bilangan *Reynolds* sehingga dapat memperkuat momentum aliran.
2. *Vortex generator* berpengaruh pada penundaan ataupun mengeliminasi separasi pada *midspan* horizontal maupun vertikal tercantum dalam tabel 5.1. Hal tersebut terjadi karena dengan adanya *vortex generator*, dapat meningkatkan turbulensi aliran sehingga aliran menjadi mampu menahan *adverse pressure gradient* dan gaya gesek yang terjadi.

**Tabel 5.1** Penundaan separasi sejauh  $\Delta x/N$  pada model *conical diffuser*

Area Ratio (AR)	Bilangan Reynolds $Re_{DI} \times 10^{-4}$	Penundaan separasi ( $\Delta x/N$ )
2	1.89	0.150
	4.50	Tidak terjadi separasi
6	1.89	0.145
	4.50	0.130
8	1.89	0.135
	4.50	0.122

3. Terjadi peningkatan performa *diffuser* berdasarkan peningkatan nilai  $C_{pr}$  dan  $C_{p_{maks}}$  setelah dipasang *circular ring vortex generator*.
4. Hubungan antar *total pressure loss coefficient* dengan *area ratio* dan bilangan *Reynolds*, dimana semakin besar bilangan *Reynolds* maka *total pressure loss coefficient* semakin kecil, sedangkan semakin besar *area ratio*-nya maka nilai *total pressure loss coefficient* semakin besar.



5. Nilai *loss coefficient* memiliki tren yang berkebalikan dengan *pressure coefficient*, dimana kedua bilangan ini dapat menentukan performa *diffuser* yang baik bila nilai *pressure recovery coefficient*-nya meningkat dan adanya reduksi *loss coefficient* ( $k$ ). Pada tabel 5.2 terlihat bahwa model conical diffuser  $AR = 6$  dan  $8$  menunjukkan performa diffuser yang baik. Sebaliknya dengan  $AR = 2$  yang mengalami penurunan performa setelah ditambahkan *vortex generator*.

**Tabel 5.2** Hubungan *pressure recovery coefficient* ( $C_{pr}$ ) dan *loss coefficient* ( $k$ )

$AR$	$2\theta$	$Re_{DI} \times 10^{-4}$	Model <i>Baseline</i>		Model <i>Modified</i>	
			$C_{pr}$	$k$	$C_{pr}$	$k$
2	30°	1.89	0.380	0.408	0.280	0.456
		4.5	0.409	0.375	0.377	0.406
6	30°	1.89	0.428	0.534	0.513	0.451
		4.5	0.497	0.475	0.595	0.379
8	30°	1.89	0.486	0.531	0.562	0.459
		4.5	0.495	0.520	0.630	0.392

6. Hubungan antara *skin friction coefficient* dengan *area ratio* dan bilangan *Reynolds*, dimana semakin besar bilangan *Reynolds* dan *area ratio*-nya maka nilai *skin friction coefficient* semakin kecil. Perhitungan  $C_f$  dalam penelitian numerik sangat dipengaruhi oleh tingkat kerapatan grid.

## 5.2 Saran

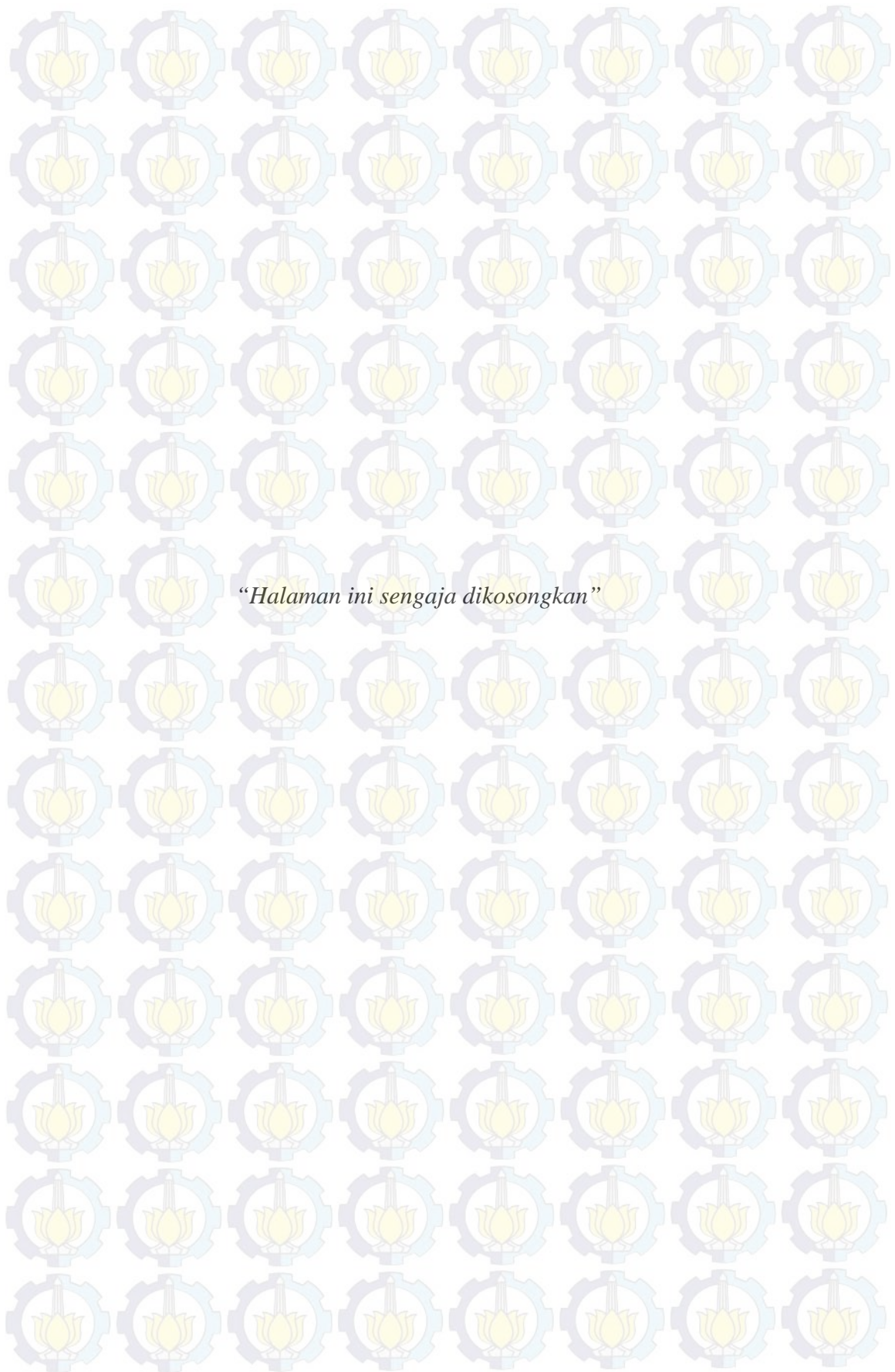
Beberapa saran yang dapat diberikan setelah melakukan penelitian dan diharapkan dapat dimanfaatkan sebagai pertimbangan dalam penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Melakukan penelitian dengan konfigurasi dan bentuk *vortex generator* yang lain sehingga didapatkan konfigurasi *vortex generator* yang optimal untuk meningkatkan performa *conical diffuser*.
2. Melakukan penelitian dengan variasi model turbulensi sehingga didapatkan model turbulensi yang sesuai dengan geometri *conical diffuser*.



- 
3. Melakukan penelitian secara eksperimen agar hasil penelitian numerik dapat divalidasi secara aktual.







## DAFTAR PUSTAKA

- [1] McDonald, A.T., R.W. Fox. 1966. *An Experimental Investigation of Incompressible Flow in Conical Diffuser*. International Journal Mechanic Science 8, 125 – 139.
- [2] Sparrow, E.M., J.P. Abraham, W.J. Minkowycz. 2009. *Flow Separation in a Diverging Conical Duct : Effect of Reynolds number and Divergence angle*. International Journal of Heat and Mass Transfer 52, 3079 – 3083.
- [3] Lee, Jin, Seong Jae Jang, Hyung Jin Sung. 2012. *Direct Numerical Simulations of Turbulent Flow in Conical Diffuser*. Journal of Turbulence 3. 1 – 29.
- [4] Nishi, Michihiro, Kouichi Youshida, Keisuke Morimitsu. 1998. *Control of separation in a conical diffuser by vortex geneartor jets*. JSME International Journal 41. 233 – 238.
- [5] Xie, Yonghui, Tao Fan, Di Zhang. 2008. *Visualization of Vortex Generator Jets for Conical Diffuser Separation Control Using PIV*. Proceedings of SPIE 7375. 7372511- 7372517.
- [6] Zhang, Yufei, Haixin Chen, Song FU. 2012. *A Karman Vortex Generator for Passive Separation Control in a Conical Diffuser*. Science China – Physics, Mechanics, Astronomy 5. 828 – 836.
- [7] Fox, Robert W., Mc Donald, Alan T., and Pritchard, Phillip J. 2011. *Introduction to Fluid Mechanics*. 8<sup>th</sup> edition. John Wiley and Sons, New York.
- [8] White, Frank M. 2001. *Fluid Mechanics*, 4<sup>th</sup> edition. McGraw Hill, New York.
- [9] Means, James L., Paul C. Glance, Hugh A. Klassen. 1972. *Analytical Investigation of Conical Diffuser*. National Aeronautics and Space Administration, Lewis Research Center, Cleveland, Ohio. NASA TM X – 2605.
- [10] Ishikawa, Katsuya, Ikou Nakamura. 1989. *Performance chart and optimum Geomtries of Conical Diffuser with Uniform Inlet Flow and Free Discharge*. The Japan Society of Mechanical Engineers International Journal 32. 559 – 567.
- [11] Idelchik, I.E, 1996. *Handbook of Hydraulic Resistance*. 3<sup>rd</sup> edition. Begell House, New York.





[12] Jeyachandran, K., V. Ganesan. 1988. *Numerical Modelling of Turbulent Flow through Conical Diffusers with Uniform and Wake Velocity Profiles at The Inlet*. Math Comput. Modelling 10. 87 – 97.

[13] Khanafi, Muhammad, 2015. *Studi Numerik Karakteristik Aliran Fluida di dalam Symmetric Flat-walled Diffuser dengan Rasio b/W Konstan dan Sudut Divergensi  $(2\theta_1) = 8^\circ$  dan  $(2\theta_1) = 12^\circ$  yang Dimodifikasi dengan Vortex Generator “Studi kasus untuk bilangan Reynolds  $Re_{w1} = 8,7 \times 10^4$ ”*. Tugas Akhir. Teknik Mesin ITS, Surabaya.

[14] El-Behery, S.M., Hamed, M.H., 2010. *A Comparative Study of Turbulence Models Performance for Turbulent Flow in a Planar Asymmetric Diffuser*. International Journal of Mechanical Systems Science and Engineering.



## RIWAYAT PENULIS



Chairunnisa merupakan nama lengkap dari penulis tesis ini. Penulis yang terlahir di Jakarta pada 16 Juni 1990 ini merupakan anak ke-empat dari lima bersaudara pasangan Bapak Syamsuir dan Ibu Fitmahartini. Penulis memulai pendidikan formal di TK Islam Ananda kemudian melanjutkan ke SD Negeri 04 Pagi Cibubur. Setelah lulus pada tahun 2002 penulis melanjutkan ke SMP Negeri 258 Jakarta dan kemudian melanjutkan ke SMA Negeri 98 Jakarta pada tahun 2005. Setelah menyelesaikan studi tingkat menengah atas, penulis menempuh pendidikan di Jurusan Teknik Mesin FTI ITS Surabaya melalui jalur SNMPTN. Semasa menempuh strata I, penulis mengambil bidang studi Konversi Energi khususnya pada lab. Perpindahan Panas dan Massa. Setelah menyelesaikan studi strata I, penulis menempuh pendidikan ke jenjang strata II berbeasiswa *Fresh Graduate* di Pascasarjana Jurusan Teknik Mesin FTI ITS Surabaya bidang studi Rekayasa Konversi Energi khususnya pada lab. Mekanika Fluida.

Selama kuliah, penulis juga aktif ikut serta dalam berbagai kegiatan dan organisasi. Tahun 2010-2011 penulis menjabat sebagai Staf Divisi Umum Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin (LBMM), kemudian tahun 2011-2012 menjabat sebagai Staf Divisi R4 Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin, dan di tahun terakhir sebagai mahasiswa tingkat akhir pada tahun 2012-2013 penulis masih berkecimpung menjadi Staf Divisi HRD Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin. Selain itu, penulis pernah menjabat Dewan Presidium Mesin yaitu suatu lembaga legislatif di tingkat jurusan. Selain aktif dalam kegiatan dan organisasi, penulis juga pernah menjadi asisten lab. Perpindahan Panas dan Massa dan asisten kelas dalam berbagai mata kuliah antara lain: Termodinamika I, Termodinamika II, dan Perpindahan panas.

Untuk semua informasi dan masukan dapat menghubungi penulis melalui email [nisaichachairunnisa61@gmail.com](mailto:nisaichachairunnisa61@gmail.com)